
La revolución del
hidrógeno verde y sus derivados
en Magallanes
FELIPE GIVOVICH
JORGE QUIROZ
KLAUS SCHMIDT-HEBBEL
EDICIONES
EL LIBERO


La revolución del
hidrógeno verde y sus derivados
en Magallanes
FELIPE GIVOVICH
JORGE QUIROZ
KLAUS SCHMIDT-HEBBEL
EDICIONES
EL LIBERO

La revolución del hidrógeno verde y sus derivados en Magallanes

Felipe Givovich

Jorge Quiroz

Klaus Schmidt-Hebbel



De la presente edición

El Líbero

1ª edición en español en El Líbero,

octubre de 2022

EDICIONES

EL LIBERO

Dirección de Publicaciones

Av. El Bosque Central 69, oficina 201

Las Condes, Santiago Chile

Teléfono (56-2) 29066113

www.ellibero.cl

ISBN impreso: 978-956-9981-30-2

ISBN digital: 978-956-9981-32-6

Diseño & diagramación: Huemul Estudio / www.huemulestudio.cl

Diagramación digital: ebooks Patagonia

www.ebookspatagonia.com

La revolución del hidrógeno verde y sus derivados en Magallanes

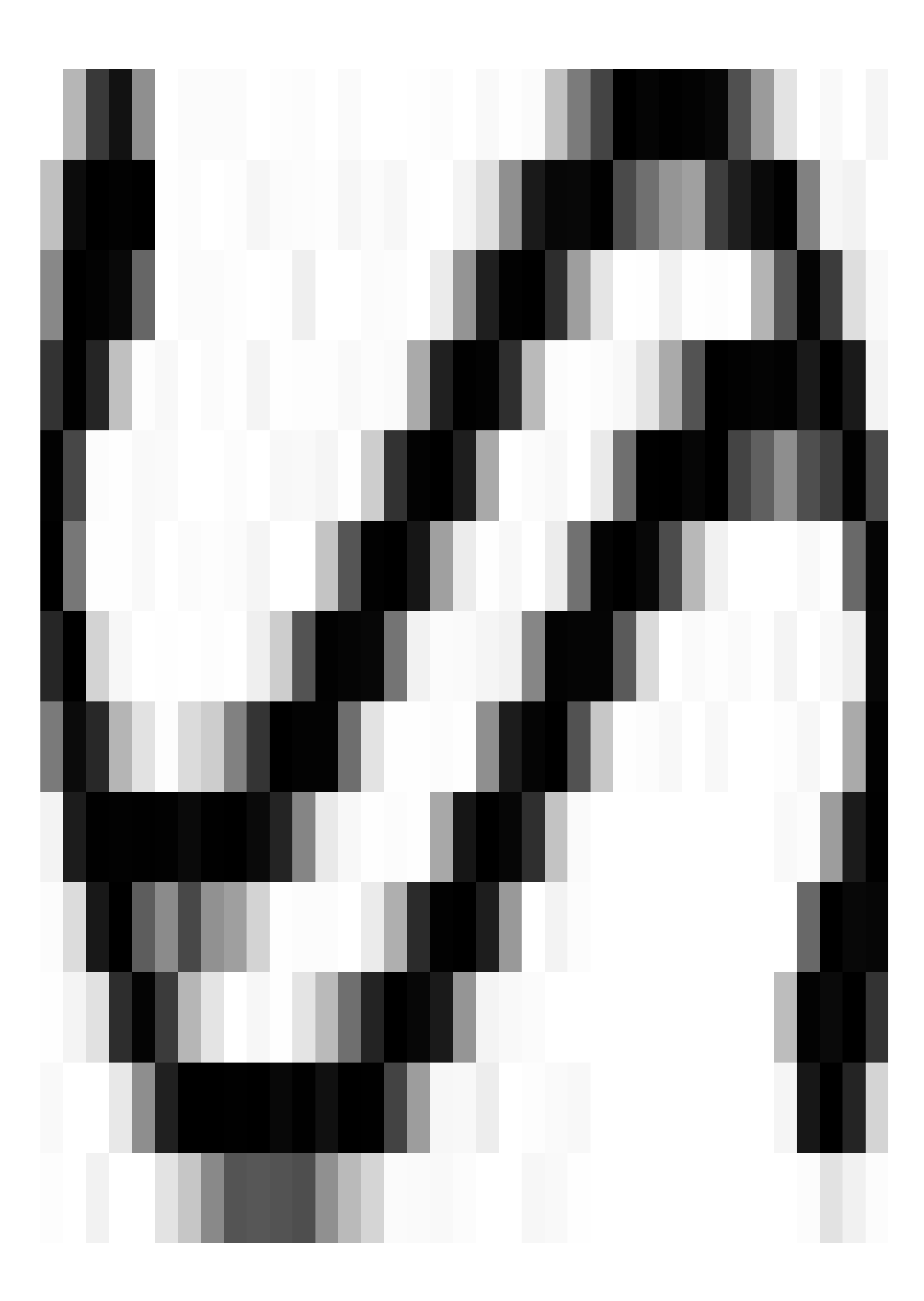
Felipe Givovich

Jorge Quiroz

Klaus Schmidt-Hebbel



Índice

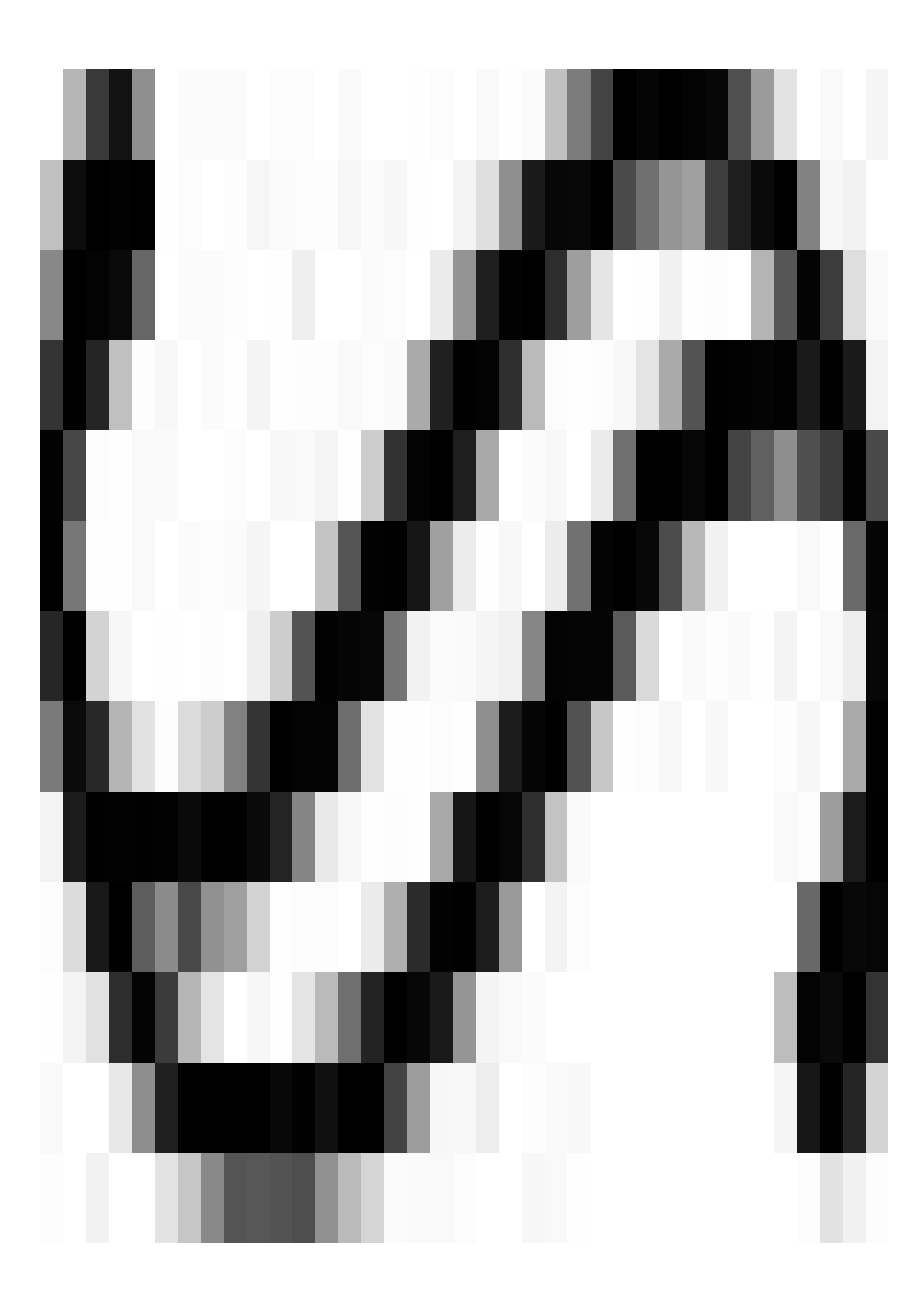


Los autores agradecen a HIF, sin cuyo respaldo este libro no habría sido posible. Agradecen en particular al equipo HIF por su apoyo desde la concepción inicial del estudio hasta su culminación en el formato que el lector tiene en sus manos.

El libro contiene diversos cálculos, fórmulas y simulaciones, a los cuales contribuyeron con su prolijo trabajo los economistas Fernando Araya y Matías Rojas, de Quiroz & Asociados.

Finalmente, y como es usual, las opiniones vertidas en este libro son de exclusiva responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de las entidades o personas aquí referidas.

Prólogo



La revolución del hidrógeno verde

Según cientos de informes de los centros de investigación y universidades más prestigiosos del mundo, además de los reportes de las Naciones Unidas, el ser humano está perdiendo la batalla contra la urgencia climática y no sabemos si podremos sobrevivir al ciclo en el que nos encontramos. Es por esto que el desarrollo de las energías renovables cumple un rol fundamental vinculado, sin exagerar, a la supervivencia del ser humano en el planeta.

Si bien la alerta por el cambio climático y sus efectos en el desarrollo es un tópico central desde fines del siglo pasado, hay pioneros como Julio Verne que en el siglo XIX ya abogaban por un desarrollo sostenible. En su libro La isla misteriosa (1875) Verne proponía el uso de lo que actualmente conocemos como hidrógeno verde obtenido de la electrólisis del agua para su uso como combustible. Es decir, presentaba al agua como “el carbón del futuro”.

Lo que plantea Verne es justamente lo que hoy está sucediendo con la revolución del hidrógeno verde. La nomenclatura del agua es H_2O y concentra en sí misma la simbiosis de dos porciones de molécula de hidrógeno con una porción de molécula de oxígeno, por lo que, al momento de realizar la electrólisis del agua y separar al oxígeno del hidrógeno, este último se transforma en una posibilidad de energía limpia y renovable.

El uso de electricidad representa casi el 70% del costo para producir hidrógeno verde, y si esto lo extrapolamos a Chile, el país está ubicado en un lugar privilegiado para realizar el proceso de manera limpia, ya sea por su enorme potencial de radiación solar del Desierto de Atacama o el fuerte viento de la Patagonia Austral. Estos vientos excepcionales, que se producen por el choque de altas presiones provocadas por el anticiclón del Pacífico con las bajas presiones y masas de aire frío del frente polar, son atrapados por grandes turbinas eólicas que movilizan el aerogenerador y producen hidrógeno verde.

Este tipo de energía y su impulso en el desarrollo económico del país permitiría no sólo disminuir los gases de efecto invernadero, sino que además propiciaría una economía verde y sostenible. Sin ir más lejos, en la Universidad de Concepción, el científico y candidato a Premio Nacional de Ciencias Exactas Igor Wilkomirsky está desarrollando una innovación tecnológica (que ya patentó) de procesamiento de cobre con hidrógeno verde que elimina todo uso de combustible fósil, generando una huella de carbono cero. Incorporar el hidrógeno verde en la producción de cobre reduciría las emisiones hasta en un 70% y el valor del metal tendría un precio superior debido a que la biodiversidad ya es un elemento de valor agregado en la explotación minera.

Magallanes se está posicionando como una región líder en el mundo de la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Hace sólo unos meses se inició el proyecto más grande del país, “Haru Oni”, en un plan piloto y ya existe el financiamiento para la siguiente planta comercial a gran escala. Además, existe el proyecto “H2 Magallanes”, que incluirá hasta 10 GW de capacidad eólica, 8 GW de capacidad de electrólisis, más una planta de desalinización a través de la cual obtendrá el agua para realizar el proceso. La sal extraída será entregada al municipio de San Gregorio -lugar donde estará emplazada la planta- para generar salmuera y enfrentar las fuertes nevadas del invierno. Es un círculo virtuoso en el que no queda prácticamente ningún elemento del proceso desperdiciado. Además, esta planta generará más de cinco mil empleos durante su etapa de construcción y más de mil empleos permanentes una vez que inicie sus operaciones.

El desarrollo de esta planta y de otras a futuro significan enormes beneficios para Magallanes y Chile desde múltiples puntos de vista: estar a la vanguardia en el desarrollo de energía verde, poder exportarla a mercados internacionales, trasladarlas hacia los sectores económicos más importantes del país como la minería e impulsar el desarrollo de un capital humano especializado y único en el mundo, formado en las universidades nacionales que se están preparando para aquello, como lo son la Universidad de Concepción o la de Magallanes.

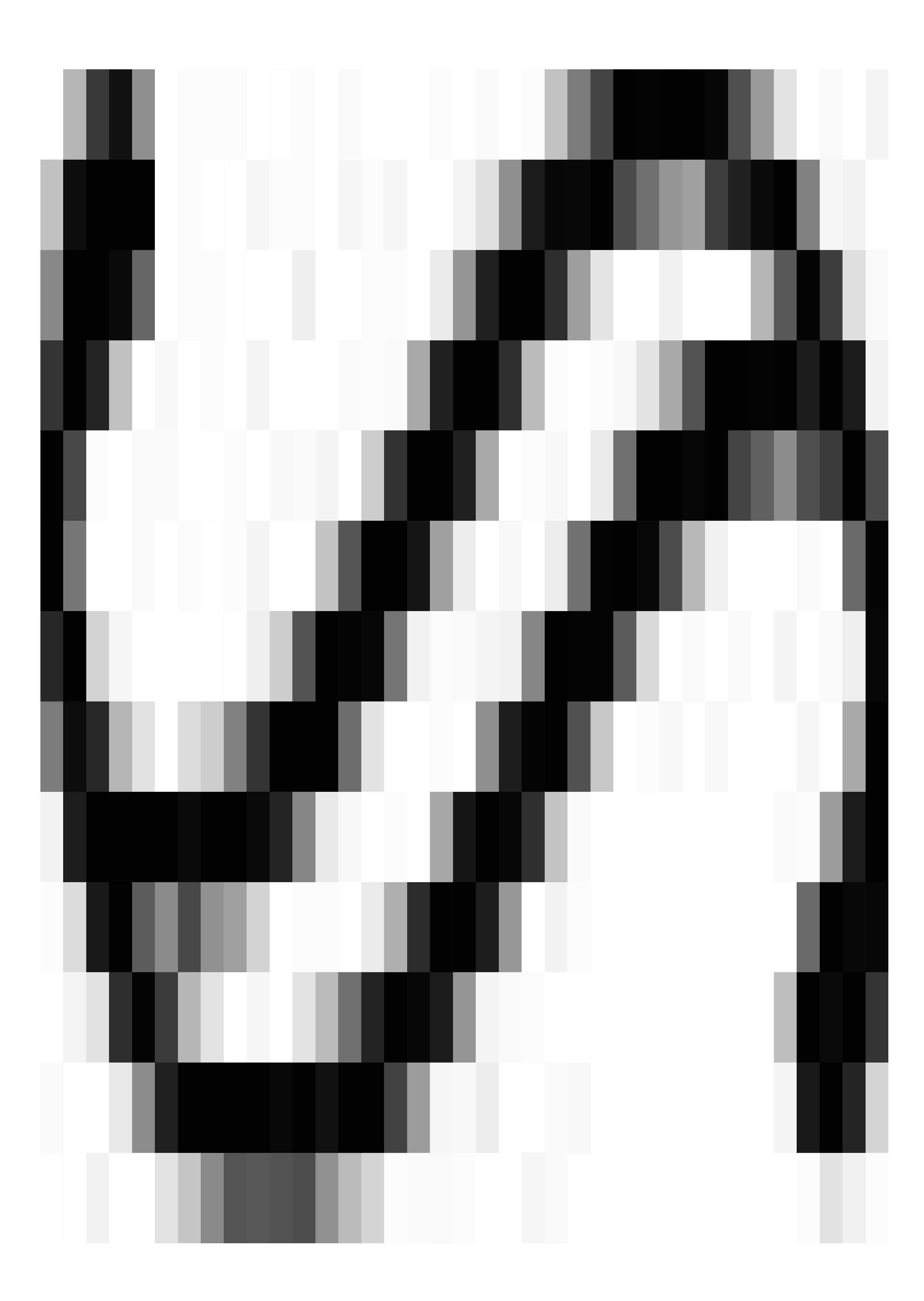
Esta oportunidad única podría situar a Chile como el primer exportador del mundo de hidrógeno verde y sus derivados, y más importante aún, en una posibilidad de ser pioneros en lograr la disminución de la huella de carbono a partir de un desarrollo sustentable y sostenible de su economía. Este informe piensa, sin dudas, hacia el futuro y nos convoca a que todos los chilenos y chilenas tengamos una mirada común frente a este desafío; enfrentemos con

seguridad lo que queda del siglo XXI y, lo más importante, que nos permita dejarles recursos y conocimientos a las generaciones venideras

RICARDO LAGOS

Presidente de Chile 2000-2006

Introducción



El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático fue categórico.[1] Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) atribuibles al ser humano son responsables de un calentamiento de aproximadamente 1,1 °C en los últimos 150 años y se prevé que esta cifra aumente a los 1,5 ºC en los próximos 20 años. De la misma forma, el informe indica que a menos que las emisiones de GEI se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento a cerca de 1,5 ºC o incluso a 2 ºC será un objetivo inalcanzable. Los efectos adversos del calentamiento global son amplios y se manifiestan en aumentos de sequías, nivel del mar, inundaciones, olas de calor, derretimiento de hielos, entre muchos otros.

El desafío planteado es enorme. Se requiere reducir las emisiones de GEI coordinadamente en todo el mundo y, al mismo tiempo, continuar por una senda de crecimiento económico que permita mantener o incrementar los niveles de vida de la población. Caminar por esta angosta senda que conduce sobre un desfiladero de alta montaña, sin caer a los dos profundos precipicios que lo delimitan, exige hacer uso de todo el ingenio humano para el reemplazo de los energéticos que se han utilizado masivamente desde la Revolución Industrial.

Desde el punto de vista tecnológico, la solución del problema requiere, entre otras cosas, reemplazar las energías fósiles por otras que no emitan GEI, en particular, las energías renovables no convencionales (ERNC). En este punto los avances de los últimos años han sido significativos y, en la actualidad, cerca de un 11% de la energía eléctrica generada en el mundo proviene de ERNC (hace sólo 10 años no superaba el 2%)[2]. Hoy las ERNC son la principal fuente de incremento en capacidad instalada en generación eléctrica y constituyen, al mismo tiempo, la alternativa de menor costo de generación disponible para la mayoría de los sistemas eléctricos en el mundo.

Dicho lo anterior, el carácter intermitente de las principales fuentes de ERNC y el hecho de que muchos de los usos energéticos sean móviles y/o lejanos a las redes de distribución eléctrica (autos, camiones, buses, aviones, barcos) exigen nuevas soluciones que permitan almacenar y transportar la energía que se produce a partir de renovables. Hoy existe un conjunto amplio de tecnologías que se encuentran en plena etapa de desarrollo o implementación temprana. La tecnología más avanzada son las baterías químicas, que ya se muestran como alternativas rentables en aplicaciones como el transporte de pasajeros y las flotas de vehículos comerciales de carga liviana. Si las proyecciones sobre el desarrollo tecnológico de las baterías se cumplen, se espera que hacia el año 2027-2030 los automóviles eléctricos sean menos costosos que los de combustión interna, condición que hace prever el reemplazo masivo de este tipo de vehículos a partir de dicha fecha, de no mediar restricciones en las redes de distribución de las ciudades y en la infraestructura de carga. Lo anterior se proyecta sin considerar las restricciones que muchos países están imponiendo a la comercialización de vehículos a combustión interna, las que podrían acelerar este proceso.

Existe un conjunto amplio de usos que obtienen su energía de combustibles líquidos y que difícilmente podrán ser electrificados en base a baterías que almacenen electricidad generada a partir de ERNC. Esto se debe principalmente a la diferencia en órdenes de magnitud que tienen las baterías con los combustibles líquidos en cuanto a su densidad energética. Así, a pesar de la evolución tecnológica de las baterías de litio, que han incrementado su densidad energética desde 200 Watts Hora por litro (Wh/l) en los años 1990 a niveles cercanos a 700 Wh/l en la actualidad, es muy poco probable que se alcancen los niveles de densidad energética de, por ejemplo, el gas natural o la gasolina, que se encuentran entre 5.500 y 9.500 Wh/l.[3] De esta forma, aquellos usos que se encuentren alejados de la red de distribución eléctrica, como maquinaria pesada, camiones mineros, buques de carga y aviones, difícilmente podrán ser electrificadas. La importancia de lo anterior radica en que estos usos representan un 50% de la demanda de petróleo y son responsables de cerca de un 40% de la emisión de GEI.

Adicionalmente, debe considerarse que aun después del fin de la comercialización del auto convencional quedará un stock remanente de autos

con motor de combustión interna que requerirá ser abastecido a partir de fuentes limpias por al menos 15 años.[4]

Es en este contexto que surge la posibilidad de utilizar hidrógeno verde, producido a partir de fuentes no contaminantes, como vector energético que permita que las aplicaciones antes mencionadas reemplacen las fuentes fósiles y hagan uso de energía limpia.

El hidrógeno (H2) es el elemento químico más abundante del universo. En la actualidad se produce principalmente a partir de la síntesis del gas natural, por lo que al hidrógeno obtenido se le denomina “hidrógeno gris”, el cual se utiliza principalmente en aplicaciones como la refinación de petróleo y la elaboración de amoniaco y de metanol. Si al proceso productivo del hidrógeno gris se agrega la captura parcial de CO2 en procesos como la reformación de metano con vapor, se habla de “hidrógeno azul”. Finalmente, si el hidrógeno es producido a partir de la electrólisis del agua utilizando ERNC, se conoce como “hidrógeno verde” (HV).

El hidrógeno, aunque puede ser usado de manera directa, requiere condiciones de almacenamiento que hacen difícil su transporte y distribución. Por lo tanto, los desarrollos tecnológicos han apuntado a su uso a través de derivados como el amoniaco o los combustibles sintéticos. En el primer caso, el hidrógeno es combinado con el nitrógeno de la atmósfera formando una molécula de amoniaco (NH3). Ello se realiza a través de un proceso conocido como Haber-Bosch, generando amoniaco verde, que puede ser usado en la fabricación de fertilizantes, para almacenar energía o como combustible en motores especialmente adaptados. En este último caso, el uso requiere desarrollar adaptaciones tecnológicas y controlar la emisión de óxidos nitrosos, gases de difusión local que generan efectos adversos en la salud de la población cercana. La otra forma de hacer uso indirecto del HV es a través de la producción de metanol y combustibles sintéticos. En este caso, el HV es combinado con CO2 capturado directamente de la atmósfera, de fuentes industriales o de biomasa, para la síntesis de metanol, el cual puede ser posteriormente transformado en

combustibles sintéticos o e-combustibles mediante el proceso methanol-to-gasoline (MTG). El resultado es un amplio abanico de hidrocarburos sintéticos neutros desde el punto de vista de GEI (i.e, las emisiones liberadas en el proceso de combustión son equivalentes a las capturadas durante la elaboración), entre los que se cuentan la e-gasolina, el e-gas licuado y el e-kerosene. La ventaja de estos combustibles sintéticos es que permiten hacer pleno uso de la tecnología y la infraestructura que actualmente utilizan los combustibles fósiles a lo largo de toda la cadena de valor, desde el transporte (barcos, camiones y oleoductos) hasta su uso final. En definitiva, permite que un motor de combustión interna funcione a partir de ERNC, utilizando como vector combustible producido a partir de HV, sin emitir GEI en términos netos.

Todos los procesos productivos antes descritos aún no han sido implementados en gran escala, aunque el futuro próximo plantea un escenario distinto. Hoy existen más de 240 proyectos de producción de HV que se construirían en los próximos años. Estos proyectos se sitúan en todo el mundo, teniendo mejores perspectivas, en términos de competitividad, aquellos ubicados en áreas geográficas con elevados factores de planta para producir electricidad en base a ERNC y que se encuentran desanclados de la red de distribución y consumo. Los proyectos con mejores perspectivas de costo se ubican en Australia (basados en ERNC solar y eólica) y en Chile (basadas en energía eólica en Magallanes y en energía solar en el norte).

A la fecha se han anunciado 60 proyectos en Chile, de los cuales cinco se ubicarán en Magallanes. Estos cinco proyectos comparten una lógica común. Se basan en el uso de energía eólica generada por aerogeneradores de última generación integrados con módulos de hidrólisis que, a partir de agua desmineralizada, producen HV. El hidrógeno resultante será combinado con nitrógeno o con CO2 para elaborar amoniaco, metanol y/o combustibles sintéticos, los que serán preferentemente destinados a mercados internacionales.

De todos los proyectos que se han anunciado, solo uno se encuentra en proceso de construcción. Se trata del proyecto “Haru Oni”, liderado por Highly

Innovative Fuels (HIF), empresa de origen chileno cuyo socio mayoritario es AME y que producirá e-combustibles a partir de HV. La empresa alemana Porsche, inversionista de HIF, comprará todo el e-combustible producido por esta planta. Siemens Energy participa como integrador tecnológico, Enel Green Power en la generación eólica y producción de HV, Gasco Magallanes como off-taker de gas licuado y la estatal ENAP como proveedora de infraestructura. Esta planta piloto se emplaza en las afueras de Punta Arenas, al norte del sector Cabo Negro, y contempla un aerogenerador de 3,4 MW, que alimentará un electrolizador de 1,25 MW, con capacidad de producción de 390 kg hidrógeno/día. El hidrógeno será luego combinado con CO2, capturado de fuentes inevitables proveniente de desechos orgánicos. Como resultado se espera obtener metanol sintético, el cual puede ser posteriormente procesado para producir e-combustibles. La e-gasolina será exportada y el e-GLP comercializado en Magallanes. El proyecto contempla también dos fases adicionales. En una segunda etapa, conocida como Fase I o Cabo Negro, la capacidad de generación se incrementará hasta 320 MW instalados, lo que permitirá producir 32 mil toneladas de hidrógeno al año, mientras que en una tercera etapa, conocida como la Fase II, se podría llegar a producir 882 mil toneladas de hidrógeno al año (con 7.820 MW instalados). Las capacidades planteadas permitirán la producción de 2,4 millones de m^3 al año de combustible sintético, además de 166 mil toneladas de e-GLP.

Teniendo todo lo anterior en consideración, el objetivo de este libro es estimar los efectos económicos, sociales y medioambientales del proyecto HIF, en todas sus etapas, y los que se esperan resulten de la instalación de la industria del HV en la región de Magallanes. Los efectos, calculados a partir de una línea base, se estiman en varias dimensiones, que incluyen exportaciones, PIB regional, empleo y emisiones, entre otros.

Nuestro principal hallazgo es que los proyectos de HV son de tal magnitud que modificarán por completo el tamaño de la economía de la Región de Magallanes y su estructura productiva. En efecto, nuestras proyecciones indican que en los próximos años se invertirán entre US$15 mil y US$40 mil millones, cifra que en su cota mínima representa 7 veces el PIB actual de la región.

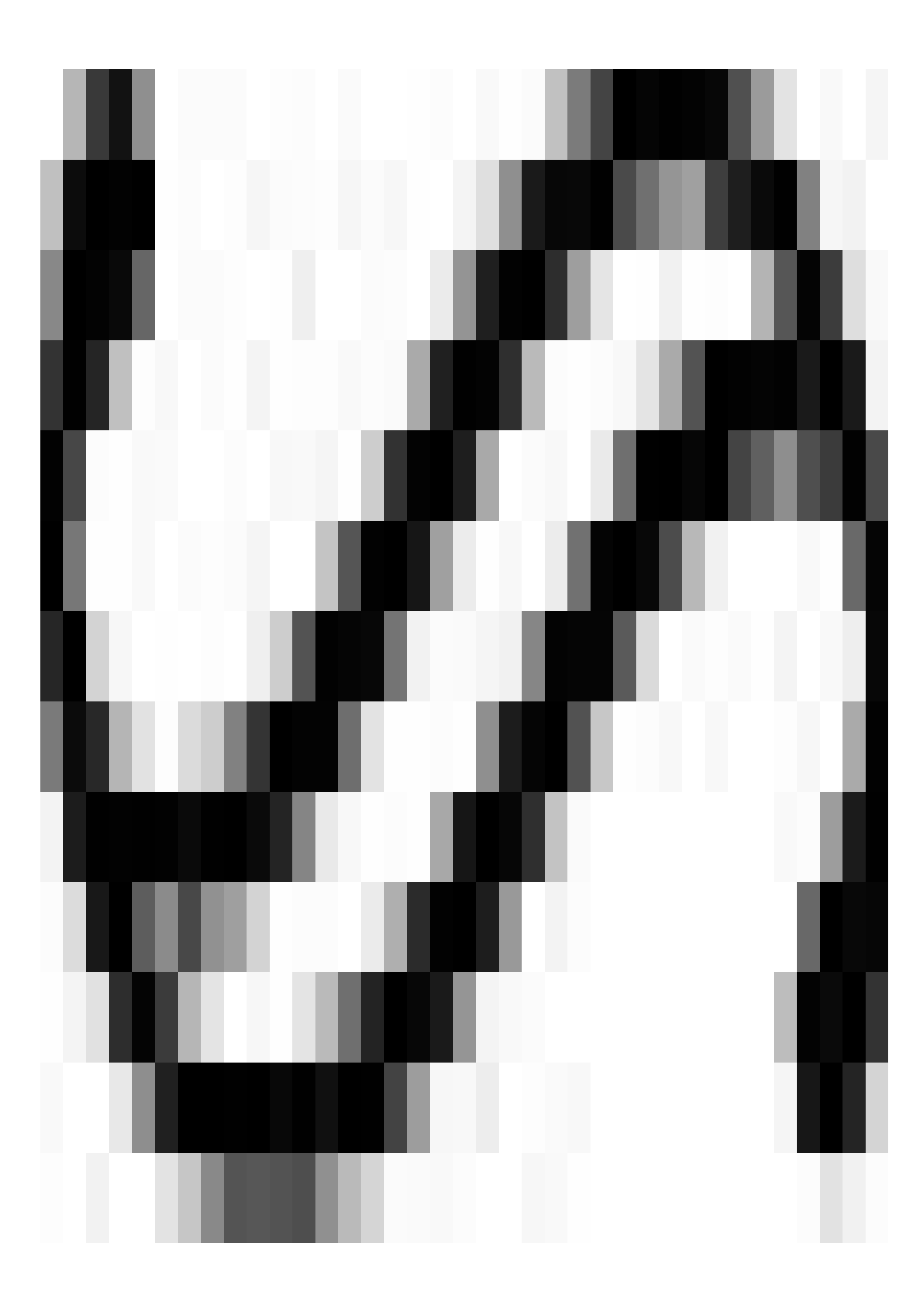
El proyecto de HIF en su Fase I Cabo Negro y Fase II aportará del orden de US$2.000 millones al PIB regional hacia el 2050, exportaciones por cerca de US$2.500 millones y 2.400 puestos de trabajo de carácter permanente, contribuyendo con una reducción de 7 millones de toneladas de CO2 al desplazar parcialmente la producción mundial de gasolina fósil, transformando a Magallanes en una región carbono negativa. En un escenario conservador estimamos un incremento en el PIB regional del orden de US$3.000 millones y en las exportaciones de US$4.000 millones, creando 4.400 puestos de trabajo permanentes y generando un ahorro en emisiones de 24 millones de toneladas de CO2. En un escenario optimista la contribución de la industria será en torno a US$4.500 millones de PIB, incrementando las exportaciones en US$5.600 millones, generando 6.400 puestos de trabajos permanentes y ahorro en emisiones de 42 millones de toneladas, lo que equivale a reducir en 34% las emisiones brutas del país. Además, en un escenario moderado se haría factible la instalación de una empresa que se dedique a la fabricación, al menos parcial, de aerogeneradores, lo que implicaría inversiones adicionales de entre US$100 y US$300 millones. En términos de empleo, estimamos que se crearán hasta 10 mil puestos de trabajo de carácter temporal asociados a la construcción de los centros industriales y a su diseño y planificación.

Finalmente, proyectamos que el desarrollo de la industria del HV impactará positivamente en el capital humano y en el I+D de la región. Es en ese contexto que el acuerdo que mantiene HIF con la Universidad de Magallanes y con su Centro de Formación Técnica asociado cobra vital importancia para la formación de los técnicos y profesionales que HIF y las otras empresas que se instalarán en la región demandarán. Además, los grandes volúmenes de inversión asociados al desarrollo de una industria revolucionaria a nivel mundial, con un impacto medioambiental muy positivo, podría generar un círculo virtuoso en Magallanes en torno al HV y a las ERNC.

Este libro se estructura de la siguiente forma. En el capítulo 1 se caracteriza el mercado actual del hidrógeno y se presenta el potencial, las proyecciones y desafíos asociados al hidrógeno verde. En el capítulo 2 se resalta el rol que

podría jugar Chile en esta industria, en función de su potencial para generar electricidad a partir de ERNC de bajo costo que le permitirá producir el HV más barato del mundo. Se destaca la ventaja absoluta de Magallanes al contar con el factor de planta de producción de ERNC más alto del mundo. El capítulo 3 describe el proyecto de HIF, mientras que el capítulo 4 presenta el impacto que tendría el desarrollo de la industria del HV en la región de Magallanes. Finalmente, el capítulo 5 presenta nuestras conclusiones.

1. El hidrógeno en el mundo



1.1 El mercado actual del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más liviano de la tabla periódica y el más abundante en el universo. Sin embargo, y precisamente debido a su ligereza, casi no se encuentra presente en la atmósfera porque la gravedad de la Tierra resulta insuficiente para evitar su escape al espacio. Como contrapartida, sí se encuentra disponible de manera casi ilimitada en compuestos químicos como el agua (junto con oxígeno) y los hidrocarburos (junto con el carbono).

La producción mundial de hidrógeno es en torno a 115 millones de toneladas anuales (MM ton/año), de las cuales 70 millones corresponden a hidrógeno puro y 45 millones a hidrógeno mezclado con otros gases. El hidrógeno es extraído principalmente de fuentes fósiles, específicamente del gas natural (GN) y del carbón. Se estima que el 71% de la producción dedicada de hidrógeno proviene del GN y 27% del carbón, empleándose en ello 205 mil millones de m^3 de GN y 105 millones de toneladas de carbón, equivalentes al 6% y 2% de la demanda mundial de cada uno de estos combustibles, respectivamente. El 2% restante de la producción mundial de hidrógeno proviene del petróleo y de la electricidad. De esta manera, en la producción de hidrógeno se utiliza el 2% de la energía global y se emiten en torno a 820 millones de toneladas de CO2 al año, equivalente al 2% de las emisiones globales de CO2 y a 10 veces las emisiones totales de Chile.[5] A este hidrógeno proveniente de fuentes fósiles se le conoce como hidrógeno negro o hidrógeno gris, dependiendo de si este proviene del carbón o del GN, respectivamente.[6]

El hidrógeno es utilizado mayoritariamente en aplicaciones industriales. De las 115 MM ton/año, la mayor parte es utilizada en la refinación de petróleo y en la industria química (ver Tabla 1). Se debe tener en consideración que su uso como vector energético es prácticamente nulo.[7]

Tabla 1: Principales usos del hidrógeno, 2019

Uso	Consumo actual	Descripción
Refinación de petróleo	38 MM ton/año (33%)	Utilizado principalmente par
Producción de amoniaco	31 MM ton/año (27%)	Utilizado principalmente en
Producción de metanol	12 MM ton/año (11%)	Utilizado como insumo en d
Producción de acero	4 MM ton/año (3%)	Utilizado principalmente en
Otros	30 MM ton/año (26%)	
Total	115 MM ton/año (100%)	

Fuente: Elaboración propia a partir de información de IEA.

En la actualidad, el proceso más utilizado en la elaboración de hidrógeno es el Reformado de Metano con Vapor (SMR o Steam Methane Reformation), utilizado para obtener la mayor parte del hidrógeno gris proveniente del GN. El SMR consiste en aplicar calor y presión al metano (CH_4) contenido en el GN para separar el hidrógeno del carbono, tal como se describe en la siguiente reacción:

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$$

Esta reacción de carácter endotérmica requiere entre 2 y 2,5 KWh por m³ de hidrógeno para generar el calor y la presión necesarios, la cual proviene también del GN en el caso del hidrógeno gris. Se estima que en todo el proceso se liberan 153 gr de CO2 equivalente por Mega Joule (MJ) de hidrógeno producido, de los cuales 75,6 gr corresponden a emisiones de CO2 y 75,4 gr a emisiones de CH4 (ver Tabla 2). Cabe señalar que existe una tecnología de captura de carbón (CCUS o Carbon Capture Utilization and Storage) que permite reducir en hasta un 60% o 90% las emisiones de CO2 liberadas en el proceso de producción de hidrógeno, dependiendo de la tecnología que se utilice, con un costo asociado de US$53/ton y US$80/ton, respectivamente, por el concepto de captura de carbono. A este hidrógeno producido con tecnología de CCUS se le conoce como hidrógeno azul. Esta innovación en el proceso productivo no evita la emisión de partículas de metano que se producen en el proceso de extracción del GN, el que se utiliza tanto para la captura como para la generación de energía. Si se suman ambos efectos, la reducción de GEI del hidrógeno azul, medida como CO2 equivalente, sería de tan solo un 12% respecto del hidrógeno gris.[8,9]

Tabla 2: Emisiones en la elaboración de hidrógeno gris y azul por etapa de producción

Cifras en gr de CO2 equivalente por MJ de hidrógeno

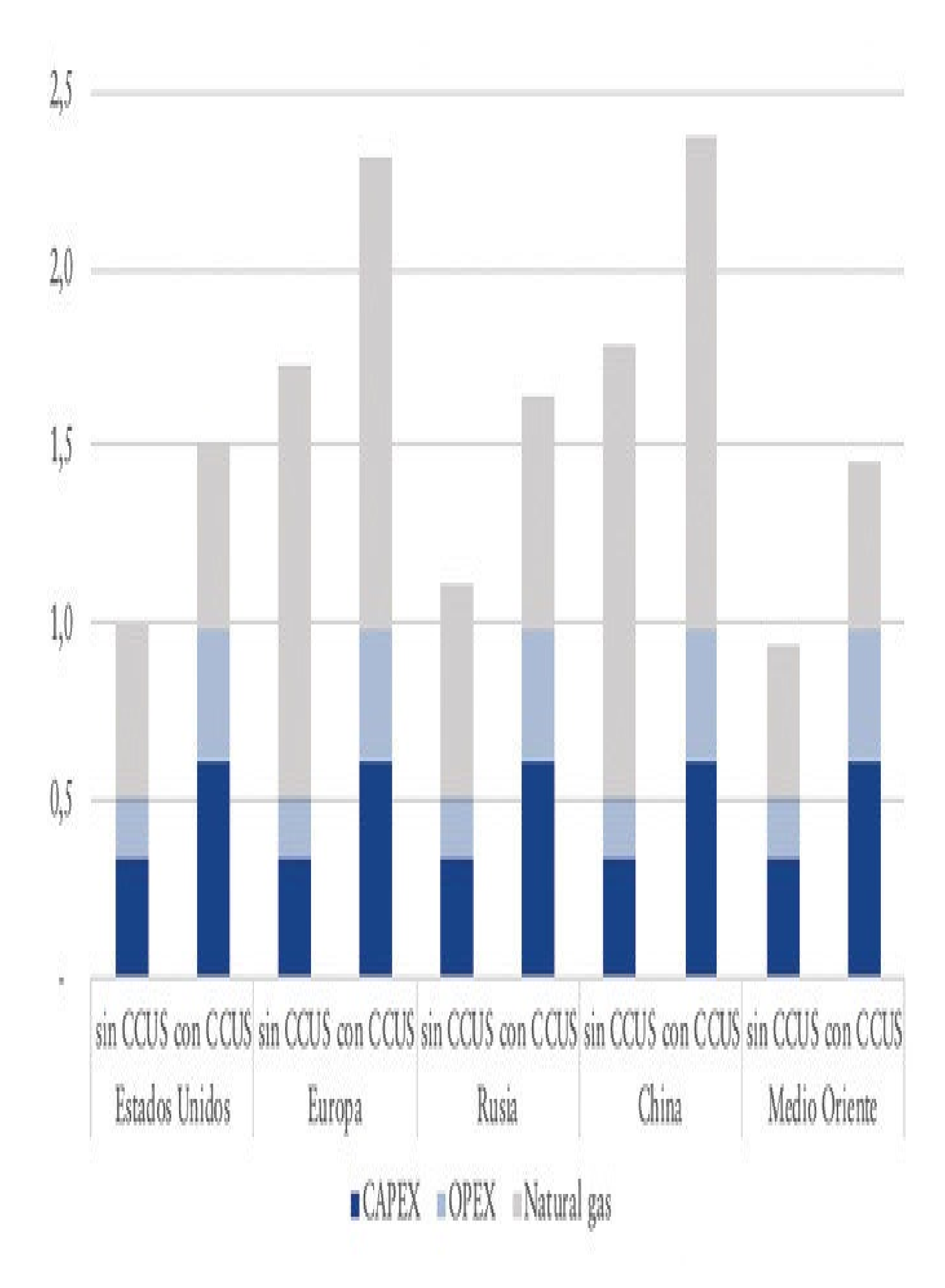
Etapa	CO2	CH4	Total	CO2	CH4	Total
Proceso SMR	38,5	42,1	80,6	5,8	42,1	47,9
Energía requerida para SMR	31,8	35,3	67,1	11,1	35,3	46,4
Energía requerida para CCUS	-	-	-	16,0	18,1	34,1
Emisiones fugitivas aguas arriba	5,3	-	5,3	6,5	-	6,5
Total	75,6	77,4	153,0	39,4	95,5	134,9

Fuente: Howarth et al, (2021).

En los últimos tres años, antes de la crisis en el mercado del GN gatillada por la guerra en Ucrania, el costo de producción del kilo de hidrógeno gris (sin CCUS) fluctuaba entre US$0,94 y US$1,45, siendo el hidrógeno más barato de la muestra el proveniente del Medio Oriente y el más costoso, el europeo. El elemento diferenciador es el costo del GN, que representa en promedio el 58% del costo total de producción, mientras que el gasto de capital (CAPEX o Capital Expenditure) da cuenta del 28% del costo y el gasto operacional (OPEX u Operational Expenditure) del 14% (ver Figura 1). En cambio, el costo de producción del kilo de hidrógeno azul (con CCUS) se ubicaba entre US$1,45 y US$2,38, destacando una menor ponderación del costo del GN en el costo total (45%) y una mayor ponderación en el costo del CAPEX (34%) y del OPEX (21%).

Figura 1: Costo de producción de hidrógeno a partir de gas natural en regiones seleccionadas, 2018

Cifras en US$/kgH



2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
-
sin CCUS con CCUS sin CCUS con CCUS sin CCUS con CCUS sin CCUS con CCUS sin CCUS con CCUS
Estados Unidos
Europa
Rusia
China
Medio Oriente
CAPEX
OPEX
Natural gas

Fuente: IEA (2019).

A modo de resumen, casi la totalidad del hidrógeno que hoy se produce es derivado de combustibles fósiles, principalmente del GN, con un costo por kilo que fluctúa entre US$0,94 y US$2,38, dependiendo del lugar en el que es producido y de si captura o no parte de las emisiones de CO2. Su uso es principalmente industrial y tiene una importante huella de carbono, incluso en sus versiones menos contaminantes.

1.2 El hidrógeno verde

10

El hidrógeno también puede producirse a partir de la electrólisis del agua. Si esta es realizada a partir de ERNC, el proceso productivo es libre de emisiones contaminantes y, por tanto, el elemento resultante es hidrógeno “verde”. Si bien este hidrógeno puede ser utilizado directamente en los mismos usos actuales, su mercado potencial se centra en su uso como portador de energía limpia.

Desde el punto de vista energético y medioambiental, el HV constituye una solución que permite que aplicaciones no conectadas a la red eléctrica utilicen energía limpia. Por ejemplo, el HV puede ser transportado a un centro de consumo distante, en forma de amoniaco o metanol, para ser transformado nuevamente en electricidad. Por esta razón su desarrollo, aún incipiente, ha concertado apoyo de distintos países y empresas líderes. Por ejemplo, Australia, Canadá, Chile, Japón y la Unión Europea ya han presentado estrategias para el desarrollo de la industria del HV. Solo la Unión Europea ha comprometido muy significativos recursos, por más de US$600 mil millones, para el desarrollo del HV en los próximos años, mientras que empresas como Porsche, Siemens, Toyota, Nissan, Amazon y Walmart han hecho lo propio, con el objetivo de hacer competitivo el HV, llevando su costo de producción (por kilo de HV) a niveles cercanos a US$1.[11],[12]

La producción de HV se hace a partir del proceso de la electrólisis del agua, proceso que consiste en hacer circular una corriente continua para separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo conocido como electrolizador, compuesto por dos terminales metálicos, ánodo y cátodo. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual se conecta el terminal positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua, mientras que el cátodo es el terminal del electrolizador al que se

conecta el terminal negativo. Luego, para producir la electrólisis, el ánodo y el cátodo son sumergidos en una solución o electrolito, en la que se aplica una tensión en corriente continua, produciéndose una reacción electroquímica en la superficie de los electrodos. Como resultado de esta reacción, se obtiene hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo, de acuerdo con la siguiente ecuación de reacción general:

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

La electrólisis del agua puede ser realizada mediante diversas tecnologías, siendo las principales la electrólisis alcalina, la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM o Proton-Exchange Membrane) y la electrólisis de óxido sólido. La electrólisis alcalina es la tecnología más desarrollada de las tres y es la que predomina en las plantas de electrólisis de gran escala. Entre las ventajas de esta tecnología destacan su menor costo relativo, porque su ánodo y cátodo utilizan elementos químicos “no nobles” como catalizadores, además de la prolongada vida útil de la celda, la cual se estima en torno a 90 mil horas. Sin embargo, la electrólisis alcalina requiere de una fuente de energía constante e ininterrumpida, por lo que son poco compatibles con generación a partir de ERNC sin respaldo.

La electrólisis PEM es comúnmente utilizada en aplicaciones de pequeña y mediana escala y destaca por tener una densidad energética mayor a la electrólisis alcalina. Esta tecnología, que utiliza una membrana de polímero delgada, pero robusta como electrolito para separar los electrodos, requiere de metales preciosos para que actúen como catalizadores, lo que se refleja en un costo mayor al de la tecnología de electrólisis alcalina. Sin embargo, este mayor costo se ve compensado por la producción de un hidrógeno de alta pureza y la posibilidad de implementar un proceso productivo intermitente, lo que lo hace compatible con el uso de ERNC.

Finalmente, la electrólisis de óxido sólido es una tecnología que actualmente se encuentra en etapa de desarrollo y que es potencialmente más eficiente que la electrólisis alcalina y PEM. Esta tecnología utiliza material cerámico sólido como electrolito y permite la electrólisis del vapor a altas temperaturas (600-900ºC), sin requerir el uso de metales preciosos. A pesar de lo anterior, la electrólisis de estado sólido tiene importantes inconvenientes, como el alto requerimiento energético para alcanzar las temperaturas del vapor, la baja durabilidad de las cerámicas y su carácter aún experimental.

El HV no es producido a escala comercial y su costo de producción actual está entre US$2,5 y US$6 el kilo, muy por sobre el costo del hidrógeno gris de US$1 el kilo en el año 2020.[13] No obstante, como se verá más adelante, se espera que este costo de producción se reduzca rápidamente en los próximos años, especialmente en aquellos países con los mejores factores de planta para la producción de ERNC, proyectándose alcanzar costos en torno a US$1 el kilo hacia 2030.

El HV, aunque se puede usar de manera directa, requiere condiciones de almacenamiento que hacen difícil su transporte y distribución.[14] En este marco, los desarrollos tecnológicos han apuntado a su uso combinado con otros elementos para producir amoniaco, metanol o combustibles sintéticos, los que son más fáciles de almacenar y transportar. En el caso del primero, el hidrógeno es combinado con el nitrógeno (N_2) de la atmósfera formando una molécula de amoniaco (NH_3), según lo indica la siguiente ecuación de equilibrio:

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2 \rightarrow NH_3$$

El amoniaco se produce a través de un proceso conocido como Haber-Bosch. Si todo el proceso productivo es realizado usando fuentes no contaminantes, el resultado obtenido es amoniaco "verde", el que puede ser empleado para reemplazar al amoniaco gris en la elaboración de fertilizantes, para almacenar energía o incluso como combustible. En este último caso, el uso requiere desarrollar adaptaciones tecnológicas y controlar la emisión de óxidos nitrosos, un gas que genera efectos adversos en la salud de la población y que actúa como GEI indirecto. El amoniaco cuenta con una red de infraestructura desplegada a nivel mundial que incluye gasoductos, camiones cisterna y barcos, lo que facilitaría el desarrollo comercial del amoniaco verde. Se estima que la industria marítima será la primera en adoptar el amoniaco verde como combustible neutro en emisiones de CO2.

La producción del amoniaco verde costaría al menos US$650/ton, mientras que el costo de producir amoniaco gris alcanzó los US$250/ton el año 2020.[15] La producción de amoniaco verde es intensiva en el uso de electricidad, componente que da cuenta del 90% del costo total de producción. Ello ocurre porque la producción de HV incrementa los requerimientos energéticos respecto al proceso tradicional basado en hidrógeno gris.

Otra forma de hacer uso indirecto del HV es en la producción de hidrocarburos sintéticos. En este caso el HV es combinado con CO2, el cual puede ser capturado de la atmósfera en un proceso conocido como Captura Directa de Aire (DAC o Direct Air Capture), desde puntos con alta concentración del gas (es decir, plantas industriales emisoras de gases) o desde fuentes biogénicas de CO2, como los desechos forestales. Una de las formas en que se combinan ambas moléculas es a partir de la síntesis de metanol (CH3OH), proceso mediante el cual se mezcla hidrógeno y CO2 en un gas de síntesis (syngas) de la forma:

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

El metanol sintético obtenido puede ser utilizado directamente como insumo para producir productos químicos, como ácido acético o formaldehído, o bien puede ser transformado en combustibles sintéticos o e-combustibles (gasolina y kerosene) mediante el proceso methanol-to-gasoline (MTG).[16] Esta reacción contempla una primera etapa de deshidratación (-H2O) de la molécula de metanol para producir éter dimetílico (CH3OCH3). Si el éter dimetílico es deshidratado se obtienen diversos hidrocarburos (C2-C5), la mayor parte de los cuales son aptos para la elaboración de gasolina, como las parafinas, aromáticos y cicloparafinas.[17] Como subproducto, se obtienen en menores cantidades hidrocarburos aptos para la elaboración de gas licuado de petróleo (GLP) y de gas combustible[18]:

$$2CH_3OH \rightarrow (-H_2O) \rightarrow CH_3OCH_3 \rightarrow (-H_2O) \rightarrow C_2 - C_5$$

$$\rightarrow parafinas + aromáticos + cicloparafinas$$

La principal ventaja de este combustible sintético es que es neutro en emisión neta de CO2, es decir, que cada molécula de CO2 liberada durante su combustión equivale a la molécula de CO2 extraída de la atmósfera para su confección. Por otra parte, y desde una perspectiva práctica, permite hacer pleno uso de la infraestructura que utiliza combustibles fósiles a lo largo de toda la cadena de valor, desde el transporte (barcos, camiones y oleoductos) hasta su uso final. En definitiva, permite que un motor de combustión interna funcione a partir de ERNC utilizando como vector el combustible producido a partir de HV, sin emitir GEI en forma neta.

A diferencia del amoniaco verde, el metanol y los e-combustibles derivados se producen de una manera distinta a sus equivalentes de origen fósil, en un proceso productivo cuya eficiencia es de 48%, es decir, que la energía contenida en el combustible producido equivale al 48% de la utilizada en su fabricación. Es por esto que los productos carbono neutrales no serían competitivos respecto de sus versiones contaminantes.[19] Se estima que el e-metanol producido con DAC de CO_2 costaría entre US$1.200/ton y US$2.400/ton, mientras que el metanol obtenido de fuentes fósiles tiene un costo estimado entre US$100/ton y US$200/ton. Las estimaciones de organismos especializados indican que la e-gasolina sería competitiva con la gasolina de origen fósil cuando el precio del hidrógeno se posicione bajo la barrera de los US$0,8/kg y el costo de la captura del CO2 sea menor a US$100/ton[20], muy por debajo de los precios actuales de US$3/kg y US$250/ton[21]. Es menester mencionar que estas estimaciones son sensibles al nivel de precio que muestren las fuentes tradicionales. Ello depende del precio internacional de los combustibles y de los impuestos que los afectan.

1.3 Proyecciones y desafíos del hidrógeno verde

La producción industrial del HV se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. Al 2020, operaban 105 plantas productoras de HV a nivel mundial, todas de escala menor y de carácter experimental, con una capacidad conjunta de electrolización de solo 0,2 GW.[22,23] No obstante, se espera que la industria tenga un desarrollo acelerado en los próximos años.

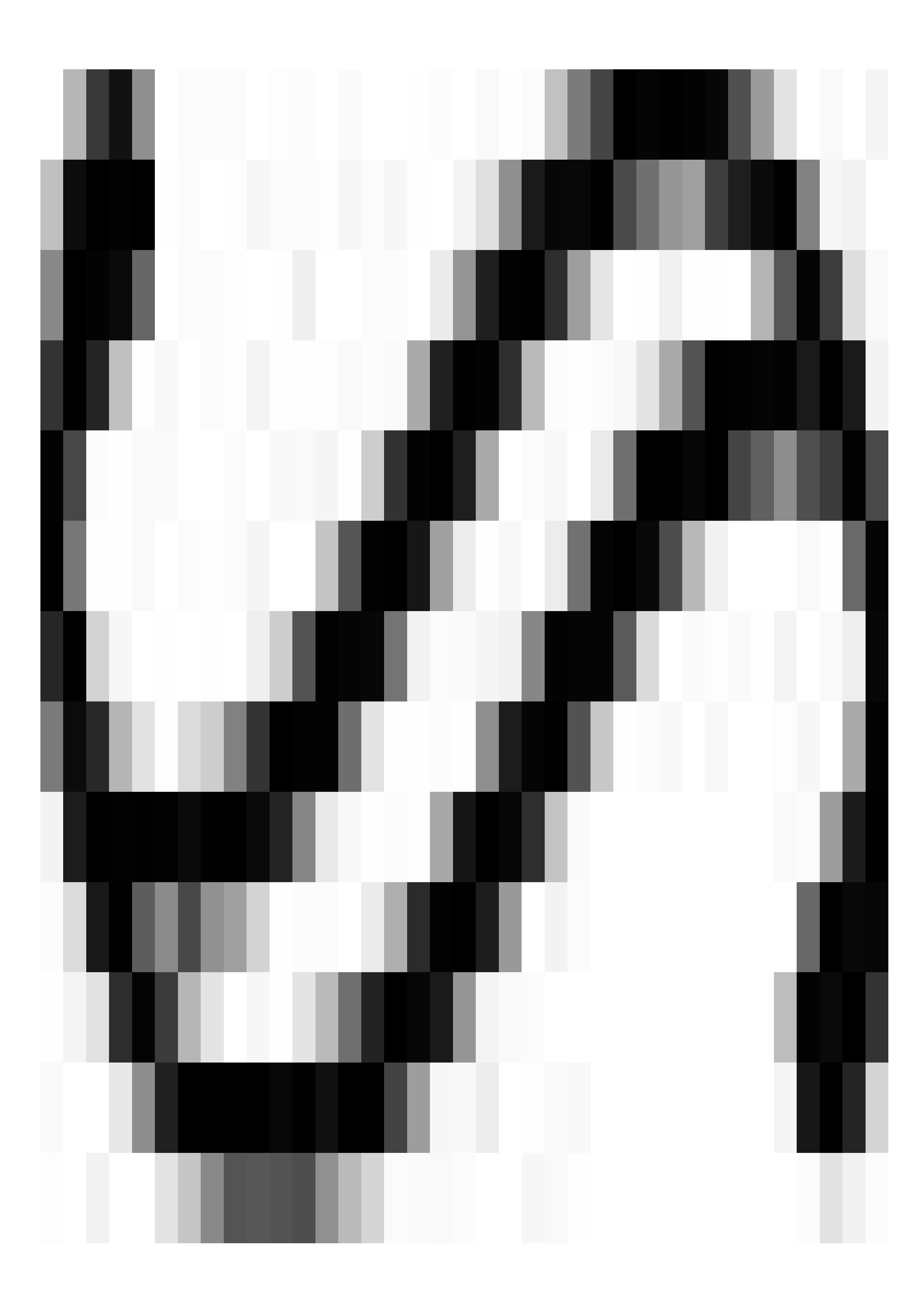
A la fecha se han anunciado 240 proyectos de HV a ser implementados en distintas partes del mundo, 97 de los cuales producirían HV para ser utilizado en procesos industriales de gran escala, 55 en proyectos de transporte, 47 en proyectos interindustriales con diversos usos finales, 24 a proyectos de infraestructura y 17 a producción a giga escala. En función de lo anterior, las últimas proyecciones de la consultora McKinsey proyectan que la electrolización pase de los 0,2 GW actuales a 16,6 GW al 2025 y a 43,9 GW al 2030.[24]

Tratándose de los costos, se proyectan caídas de hasta 80% en el costo de la electrolización y del 50% en el costo de generación eléctrica.[25] De esta manera, al 2030 el costo nivelado de producción del kilo de HV alcanzaría niveles entre US$1 y US$1,8, rango de valores que lo harían competitivo con el hidrógeno gris. Es por esta razón que la mayor parte de los proyectos anunciados hasta la fecha producirían en primera instancia amoniaco o metanol verde para competir en los mismos mercados en los que se utiliza el hidrógeno proveniente de combustibles fósiles.

La competitividad de los e-combustibles con su alternativa tradicional requiere sortear obstáculos mayores, porque no depende únicamente de alcanzar la paridad con el hidrógeno gris, sino que requiere alcanzar costos equivalentes a la extracción, refinación y procesamiento de combustibles fósiles tradicionales.

Con todo, existe amplio interés por invertir en estos combustibles carbono neutrales. Por ejemplo, la automotora Porsche está participando en el proyecto HIF de producción de e-combustibles en Magallanes que se analiza en el capítulo 3, mientras que la naviera Maersk recientemente anunció que añadirá a su flota naves que utilizarán metanol verde como combustible, cuyo mayor costo será asumido por empresas como Amazon y H&M, con el objetivo de reducir su huella de carbono.[26] Se espera, por tanto, que los e-combustibles se hagan más competitivos en los próximos años, como consecuencia de economías de escala, mejoras tecnológicas y reducciones en el precio de la energía eléctrica derivadas de la utilización de tecnologías más eficientes de generación de ERNC. A ello se podría agregar las consecuencias del retiro progresivo de las alternativas fósiles y la aplicación de impuestos crecientes a los combustibles tradicionales.

2. El desarrollo de la industria nacional de hidrógeno verde



Como se indicó en el capítulo anterior, el HV es, en esencia, un vector energético que permite extender el uso de las ERNC a aplicaciones alejadas de la red o que requieren una alta densidad energética. Desde esta perspectiva, su costo será siempre superior al que represente el uso directo de las ERNC, pero, dependiendo de la eficiencia del proceso productivo y de la evolución de la tecnología, podría llegar a ser inferior al costo que representa la solución fósil equivalente. Al año 2020, las estimaciones indican que el HV sería entre 2 y 3 veces más costoso que su par fósil, el hidrógeno gris.[27] En el caso del amoniaco la brecha sería de 2,6 veces, mientras que la versión carbono neutral del metanol costaría 10 veces más que su par fósil.[28]

Esta situación no es muy distinta a la que se apreció en similares desarrollos tecnológicos pasados. Por ejemplo, hace sólo 11 años las energías solares fotovoltaicas promediaban US$381/MWh a nivel mundial, precio que superaba en más de un 200% los US$100/MWh que representaban las soluciones fósiles. Dicha brecha se cerró en sólo 6 años.[29] A modo de referencia, la licitación de suministro eléctrico 2021/01 en Chile permitió alcanzar precios de US$23,78/MWh. Una evolución similar se observa en los mercados de aerogeneradores y baterías eléctricas.

Estos procesos de desarrollo tecnológico, innovación y rendimientos a escala tienen ciertos rasgos comunes. En una primera etapa la solución "verde" se desarrolla a partir de nichos de consumo, muchas veces apalancados en incentivos específicos que apuntan a su desarrollo. Ese ha sido el caso de las ERNC, que en un principio fueron altamente subsidiadas a partir de políticas tipo feed-in-tariff, en países como Alemania y España, o la electromovilidad, con subsidios específicos en países como China y Estados Unidos[30]. Sin embargo, a medida que la tecnología adquiere madurez y se vuelve más competitiva, su uso se extiende a partir de la dominancia tecnológica y de costos respecto a las alternativas tradicionales.

El caso del HV no difiere de la realidad descrita. En la actualidad es una solución de nicho, casi experimental, pero sobre la cual hay consenso respecto a su potencial como reemplazo definitivo de los combustibles fósiles en usos industriales-químicos y en aplicaciones desconectadas de la red. Los gobiernos y fondos de inversión de distintas partes del mundo han decidido apostar por el desarrollo de esta tecnología y la pregunta, en este momento, es: ¿cuál es la manera más eficiente y menos riesgosa de hacerlo?

La respuesta es simple: se debe buscar su desarrollo en los lugares que permitan un menor costo productivo total. Ello tiene que ver, entre otras cosas, con la disponibilidad de energía, infraestructura, estructura tributaria y distancia (costos de transporte). El lugar que mejor equilibre estas condiciones reunirá parte importante del desarrollo inicial de esta tecnología.

La combinación de los factores anteriores de ventajas competitivas parece dar lugar a dos grandes polos de desarrollo. Chile y Australia son los países con el mayor potencial de producir HV al menor costo, superando a potencias como Estados Unidos y China (ver Tabla 3). Se estima que al año 2030, Chile producirá el HV más barato del mundo, a un costo cercano a US$1/kg, seguido por Australia, para el cual se estiman costos en torno a US$1,2/kg.[31] Es por esta razón que, de los 240 proyectos que se han anunciado en el mundo, 26 operarán en Australia y 15 en Chile (ver Tabla 3). Cabe señalar que los 15 proyectos de Chile corresponden sólo a aquellos que ya han definido su fecha de entrada en operación, existiendo varias iniciativas adicionales que, de concretarse, elevarían este número a más de 40.

Tabla 3: Selección de países con potencial productivo de hidrógeno verde

País	Fuente de energía renovable	Número de proyectos de HV	Proy
Australia	Solar y eólica	26	1,2
Chile	Solar y eólica	15	1,0
China	Solar y eólica	30	1,5
Estados Unidos	Solar y eólica	31	1,4

Fuente: Elaboración propia en base a información del Ministerio de Energía y Consejo del Hidrógeno.

Lo anterior no resulta extraño. Tanto Chile como Australia reúnen condiciones para un masivo desarrollo de ERNC. En el caso particular de Chile, los factores de planta fotovoltaicos en la zona norte y los eólicos en la zona sur son de los más altos a nivel global.

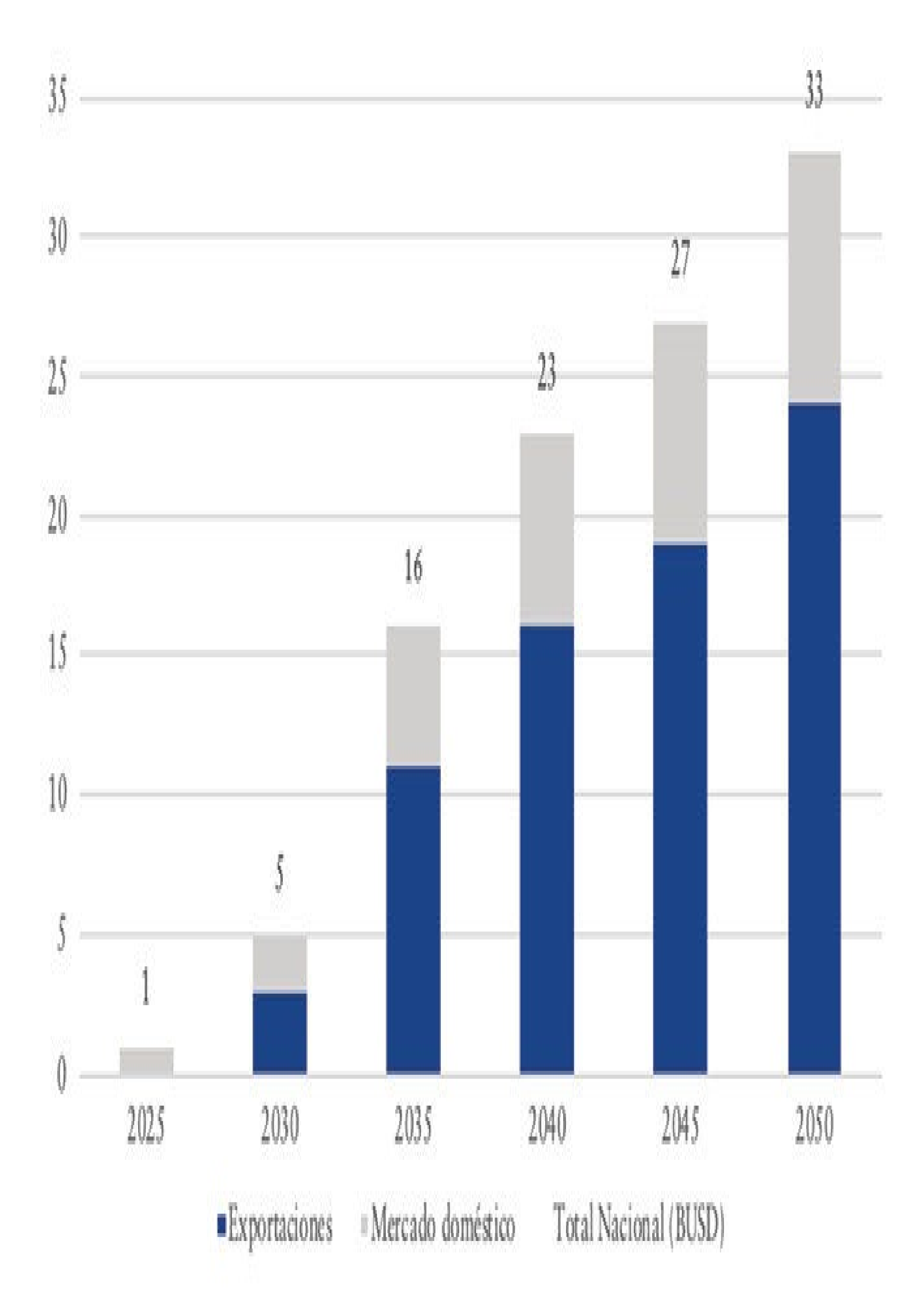
Otro elemento en común que comparten Chile y Australia es que su potencial en la generación eléctrica a partir de ERNC se encuentra acotado a su uso local, vale decir, hay poco o nulo potencial para su exportación dada su aislación geográfica. Como hemos indicado, el uso más eficiente de las ERNC es la inyección de energía directa en la red, por lo que zonas con potencial de generación de ERNC conectados a la red deberían priorizar su inyección directa a esta. Esto es lo que debiese ocurrir en otras regiones con alto potencial para instalar ERNC, como Europa Continental, que cuenta con un sistema de generación interconectado entre países. Este no es el caso de Chile o Australia, donde el uso del potencial ERNC exige el empleo de un vector energético que permita su exportación.

2.1 El compromiso de Chile con el desarrollo del hidrógeno verde

El Gobierno de Chile, en el marco de la Estrategia Nacional del Desarrollo del Hidrógeno Verde, comprometió un fondo público de US$50 millones para financiar proyectos que cuenten con una capacidad mínima de electrolización de 10 MW y que se encuentren en operaciones antes de 2025.[32] Obviamente se anticipa que este fondo público sea un capital semilla, constituyendo solo una fracción minúscula de la inversión privada en el desarrollo de esta industria en el país, la que se estima podría llegar a más de US$15 mil millones al año 2030. El valor de la producción de HV y sus derivados se proyecta en US$5 mil millones al 2030, US$23 mil millones al 2040 y US$33 mil millones al 2050, 70% de la cual corresponderá a exportaciones (Figura 2).[33] A modo de contexto, los US$33 mil millones proyectados al 2050 equivalen al 13% del PIB de Chile, al 45% de las exportaciones totales y a 87% de las exportaciones de cobre del año 2020.

Figura 2: Proyección del mercado chileno del hidrógeno verde y sus derivados

Miles de millones de dólares



35
30
25
20
15
10
5
0
1
5
16
23
27
33
2025
2030
2035
2040
2045
2050
Exportaciones
Mercado doméstico
Total Nacional (BUSD)

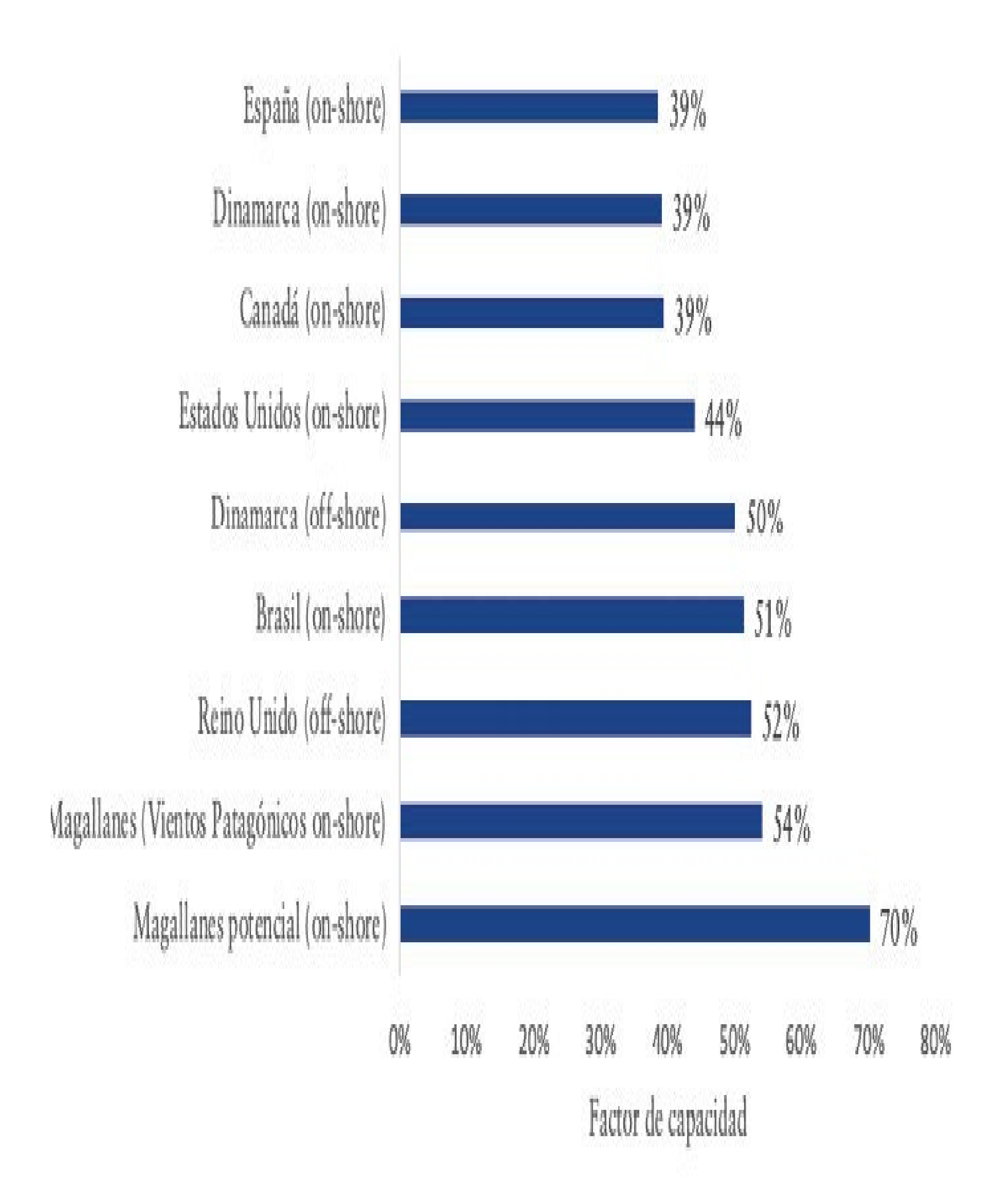
Fuente: Ministerios de Energía y Minería (2021).

2.2 La ventaja de la región de Magallanes

La región de Magallanes cuenta con una amplia disponibilidad de agua y recursos eólicos. La región tiene una infraestructura portuaria y petrolífera subutilizada, remanente de depósitos de petróleo y gas en sus etapas finales de producción. Además, Magallanes se beneficia de importantes ventajas tributarias para la inversión, producción e importación de distintos bienes y servicios. Todo lo anterior hace que tenga enormes ventajas comparativas –y absolutas– para desarrollar una industria de HV.

Respecto del recurso eólico, los datos indican que la velocidad del viento en la región de Magallanes promedia 42 km/hr durante el año (11,9 m/s).[34] Por otra parte, estimaciones del Ministerio de Energía señalan que en la región de Magallanes los parques eólicos podrían alcanzar factores de planta de más de 55%, similares a los exhibidos por el parque Vientos Patagónicos, que se encuentra ya instalado en la región.[35],[36] Fuentes de la industria indican que en algunos sectores de la pampa magallánica los factores de planta podrían alcanzar hasta el 70%. Así, Magallanes cuenta con una ventaja absoluta en comparación con otros lugares del planeta en los cuales se podrían instalar parques eólicos. El mayor factor de planta del mundo fuera de Chile es de 52%, correspondiendo a aerogeneradores off-shore en el Reino Unido (ver Figura 3).[37]

Figura 3: Factores de planta de energía eólica en el mundo



España (on-shore)
39%
Dinamarca (on-shore)
39%
Canadá (on-shore)
39%
Estados Unidos (on-shore)
44%
Dinamarca (off-shore)
50%
Brasil (on-shore)
51%
Reino Unido (off-shore)
52%
Magallanes (Vientos Patagónicos on-shore)
54%
Magallanes potencial (on-shore)
70%
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
Factor de capacidad

Fuente: IRENA Renewable Cost Database y Ministerio de Energía de Chile.

Entre los amplios beneficios tributarios para incentivar la inversión se incluyen generosos créditos tributarios imputables al impuesto de primera categoría (Ley Austral) y regímenes tributarios especiales, como la exención del impuesto de primera categoría y del pago del IVA (Ley Navarino).[38]

Se une a lo anterior la existencia de infraestructura complementaria que facilita la logística de todo el proceso productivo, incluida la importación de insumos como aerogeneradores y electrolizadores, y la exportación del hidrógeno y sus derivados producidos. La región de Magallanes y la zona de Punta Arenas cuentan con cinco puertos, 1.400 km de gasoductos y experiencia en el desarrollo de la industria petroquímica. Esta última ha sido desarrollada por ENAP desde el año 1945 y complementada por la importante inversión que desarrolló la empresa Methanex a fines de los años 1990 e inicios de los 2000. Finalmente, la región cuenta con un amplio mercado secundario para la colocación de gas propano para satisfacer la alta demanda para el consumo residencial y hotelero. El Recuadro 1 resume la infraestructura portuaria de la región.

▪

Recuadro 1 Infraestructura portuaria Magallanes La región de Magallanes cuenta

Fuente: Elaboración propia.

Otro factor que favorece el desarrollo de la industria del HV en Magallanes es la presencia de capital humano avanzado y de centros de formación con tradición en innovación. La Universidad de Magallanes, que en su momento formó a más de doscientos profesionales para trabajar en la industria petroquímica, ha participado activamente en la estrategia regional del HV. Consta a los autores de este libro, por reuniones sostenidas con representantes de dicha universidad, que existe una gran disposición de sus autoridades para ampliar la oferta académica de formación de profesionales y técnicos de la universidad y de su Centro de Formación Técnica asociado, y generar el capital humano que permita fortalecer la industria de las ERNC y del HV en la región.

Magallanes tiene una baja densidad poblacional, de 1,1 habitantes por km^2, y su población está concentrada principalmente en Punta Arenas y secundariamente en las ciudades de Puerto Natales y Porvenir. También es ventajosa la concentración de la tierra en grandes estancias ganaderas, las que reducen los costos de transacción para los proyectos de HV, permitiendo que convivan ambos negocios: el ganadero y el arriendo de tierras para la instalación de aerogeneradores y torres de transmisión eléctrica.

La única desventaja de la región respecto a otros productores potenciales de HV y sus derivados es la lejanía de los principales centros de consumo del mundo. Como se mencionó, el HV debe ser transformado en un portador de energía -como hidrógeno líquido, amoniaco verde, metanol verde o e-combustibles- para poder ser almacenado y posteriormente exportado a otro mercado. Adicionalmente, el HV puede ser exportado de manera indirecta si se ocupa, por ejemplo, en el proceso productivo del cobre o del acero. Por cada mil kilómetros de distancia se incurre en un costo de transporte de US$0,14 por kilogramo de hidrógeno.[39] Por lo tanto, el HV chileno sería más competitivo que el australiano en los puertos de destino de Estados Unidos y de la Unión Europea, pero no así

en Japón y Corea del Sur (Tabla 4).

Tabla 4: Distancia y costo de transporte de hidrógeno desde Chile y Australia a los centros de consumo

	Destino		
Origen/Mercados	Japón/Corea del Sur	Estados Unidos	Unión
	Distancia (km) (*)		
Chile (Magallanes)	18.000	10.000	15.00(
Australia (Sidney)	8.000	14.000	20.00(
	Costo envío (US$/kg de hidrógeno)		
Chile	2,48	1,38	2,07
Australia	1,10	1,93	2,76

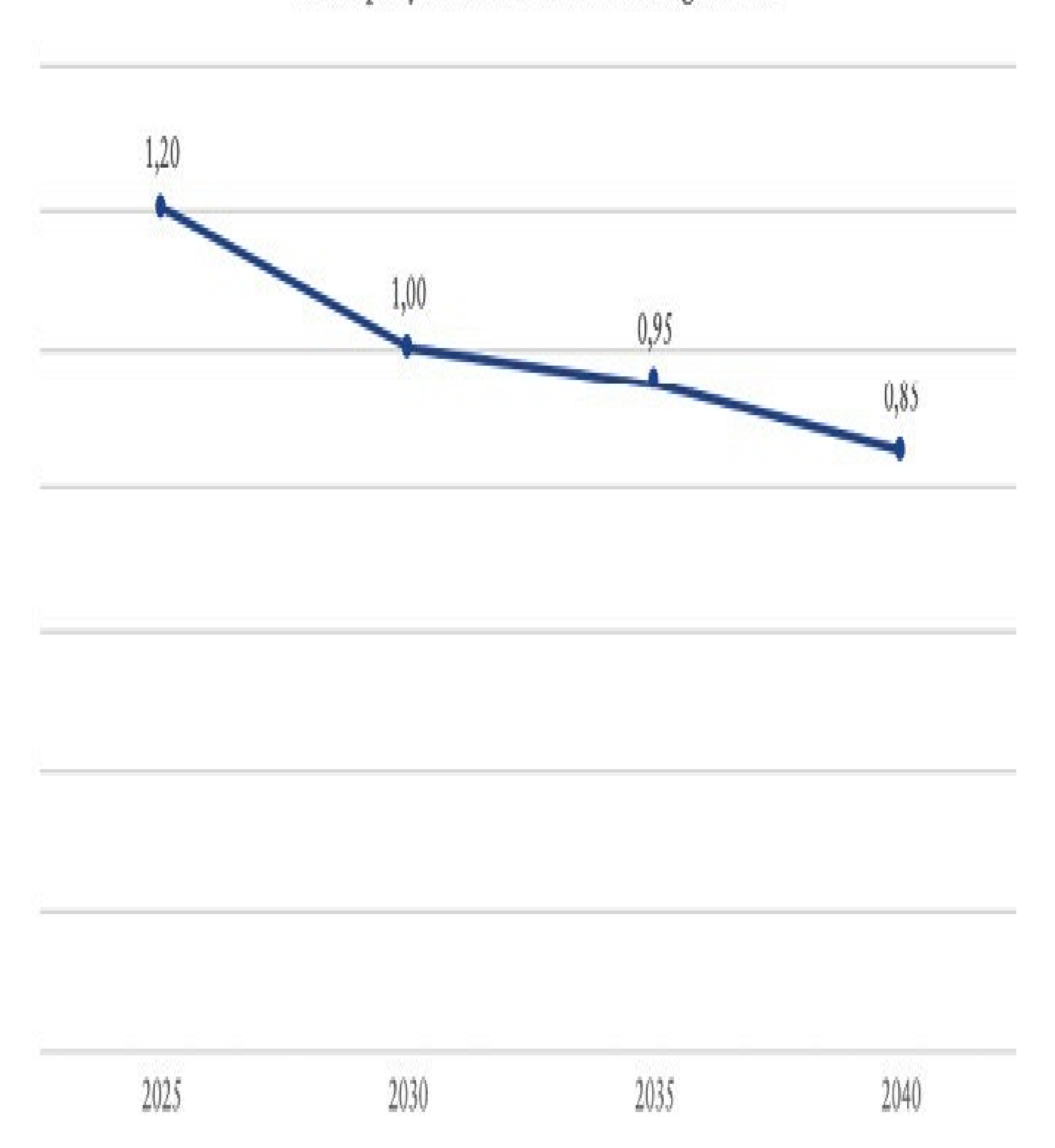
(*) Distancias son aproximadas.

Fuente: Elaboración propia en base al Consejo del Hidrógeno.

En síntesis, todo apunta a que la industria del HV tendrá un acelerado desarrollo en el que Magallanes jugará un papel protagónico. De acuerdo con estimaciones recientes, el costo asociado a la producción de energía eólica debiese disminuir del rango actual de US$21-23/Kwh a US$16-18/Kwh al año 2035, principalmente por mejoras tecnológicas que disminuyan el costo de fabricación y la instalación de las turbinas eólicas, lo que beneficiaría de manera transversal a todos los países con potencial eólico. No obstante, ningún desarrollo tecnológico será capaz de cambiar el factor de planta inherente a cada región, lo que convierte a la ventaja absoluta de Magallanes en una de carácter permanente. Así, al año 2030, se proyecta que el HV en la región de Magallanes pueda ser producido a un precio de US$1,05/kg, cifra que se reduciría a US$0,85/kg al año 2040 (Figura 4).

Figura 4: Proyección del costo del hidrógeno verde producido en Magallanes 2025-2040

(US$/kg HV)


Costo proyectado del HV en Magallanes
1,20
1,00
0,95
0,85
2025
2030
2035
2040

Fuente: Ministerio de Energía y Minería (2021).

2.3 Los proyectos de hidrógeno verde en la región

La ventaja absoluta de Magallanes se está materializando en importantes proyectos de inversión para la región, que se activarán en los próximos 5 años. De los 15 proyectos anunciados a nivel nacional, cinco se emplazarán en Magallanes y producirán HV a partir de energía eólica. Tres de ellos se espera que produzcan amoniaco verde para luego exportarlo, mientras que sólo el proyecto de HIF, que es analizado en detalle en el capítulo 3, se enfoca en la producción de metanol y de combustibles sintéticos o e-combustibles. La inversión comprometida a la fecha para los próximos 5 años en los proyectos de HIF, HNH Energy y Selknam alcanza US$20.731 millones, cifra que equivale a 10 veces el PIB de Magallanes del año 2020.[40],[41] Esta inversión aumentará la capacidad eólica instalada en la región desde 12,9 MW en el presente a 10.832 MW hacia el año 2030, la que permitirá producir cerca de 1 millón de toneladas de HV (ver Tabla 5). A ello se suman los proyectos de H1 Magallanes y el de Total Energy, los que de concretarse llevarán la capacidad eólica de Magallanes a 21 mil MW, lo que equivale a 5,6 veces la capacidad eólica actualmente instalada a nivel nacional.[42]

Tabla 5: Proyectos de hidrógeno verde en Magallanes

Nombre proyecto	Capacidad eólica (MW)	Inicio operación	P
HIF ("Haru Oni" y "Cabo Negro")	320	2025	M
HIF (fase II)	7.500	2027	M
HNH Energy	1.800	2026	A
H1 Magallanes	2.200	2028	A
Selknam	1.200	2026-2030	A

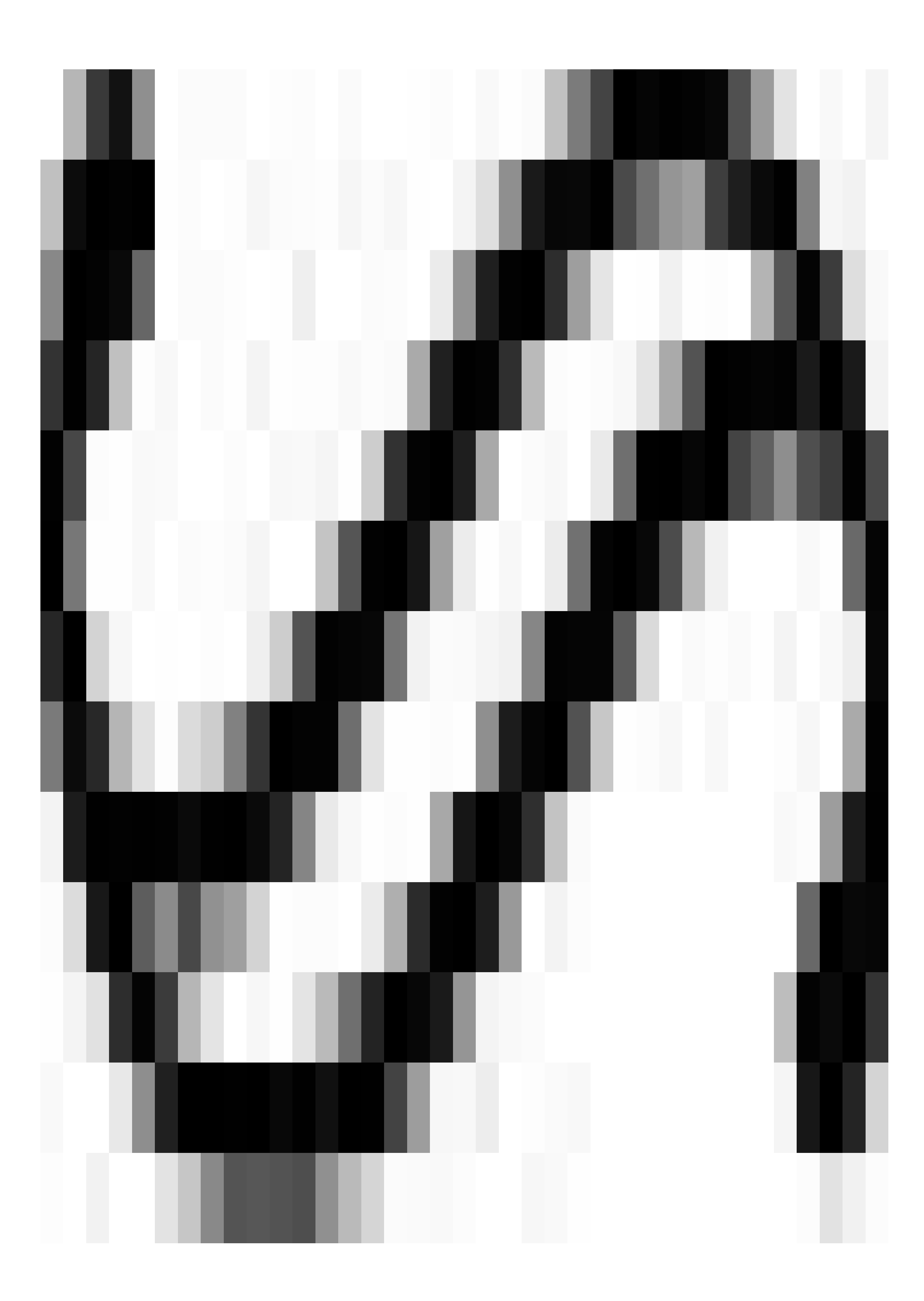
Total Energy	8.000	2027	A

Fuente: Ministerio de Energía (2021). “Chile’s Green Hydrogen Strategy and Investment opportunities”.

La inversión comprometida a la fecha en Magallanes, que equivale a 10 veces el PIB regional, cubriría menos del 10% del potencial de Magallanes para desarrollar la industria del HV. Se estima que la región tiene un potencial estimado de 126.000 MW de generación eólica, cinco veces la capacidad instalada actual de la matriz energética de Chile.[43] Lo anterior permitiría generar en torno a 540.000 GWh/año, siete veces el consumo actual de electricidad en Chile (77.000 GWh). Por lo tanto, la región de Magallanes tendría un potencial para producir más de 10 millones de toneladas de HV al año, cifra que representa un 95% del consumo energético del país. Cabe señalar que, de concretarse la totalidad de los proyectos anunciados, la industria del HV alcanzará en torno al 17% de la capacidad potencial eólica de Magallanes.

En resumen, el HV generará en Magallanes una disrupción sin precedentes. Los proyectos de HIF, HNH Energy y Selknam, que ya han sido confirmados, contemplan una inversión que multiplica por diez el producto de la región y, dado el potencial de Magallanes, es altamente probable que esta inversión sea solo la primera parte de un volumen mucho mayor. Estimamos que este proceso modificará por completo el escenario productivo, económico, social y tecnológico de la región.

3. El proyecto HIF

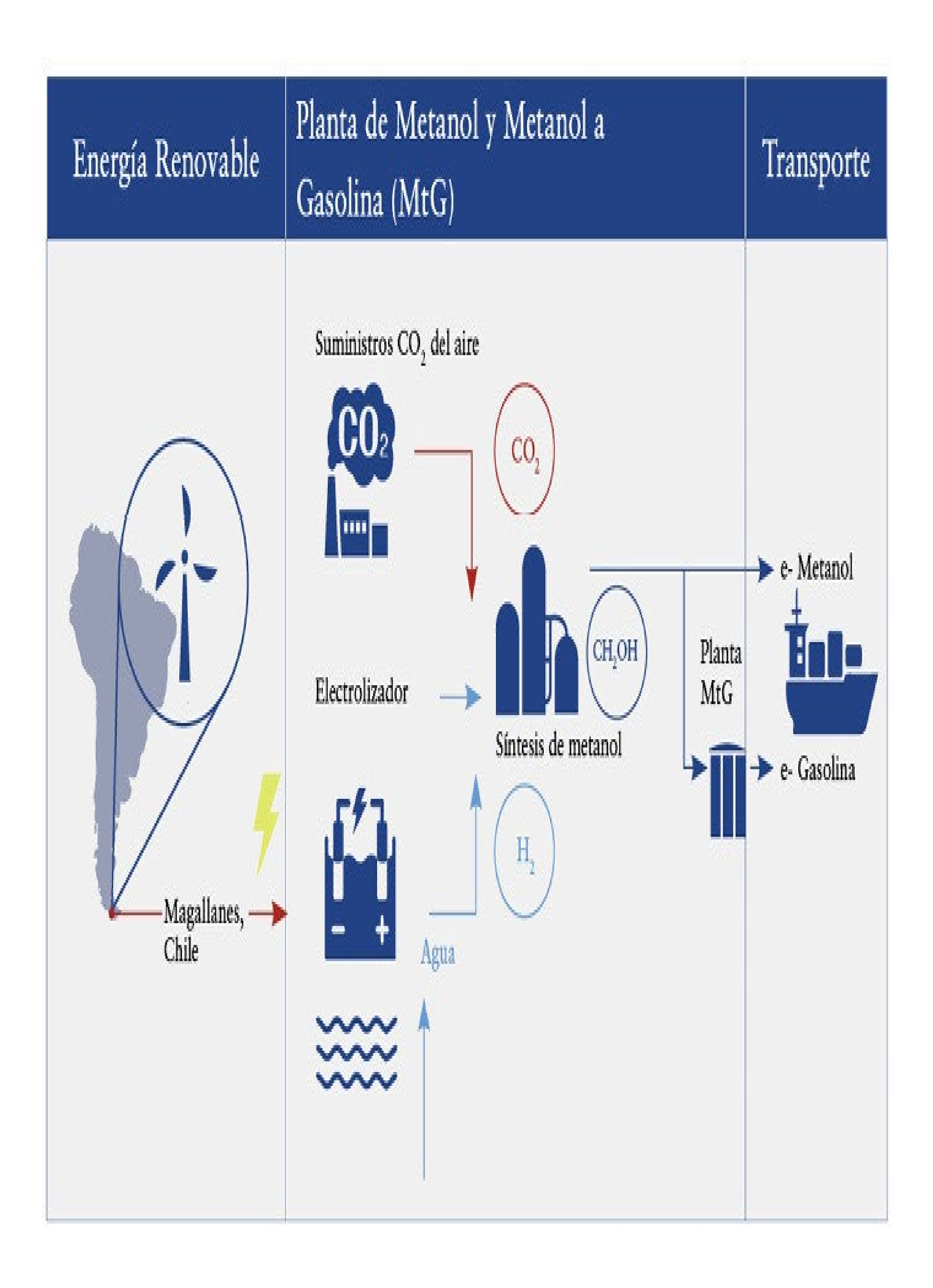


HIF es una empresa multinacional, de origen chileno, que está desarrollando un proyecto para la producción de combustibles sintéticos en base a HV. El proyecto piloto HIF “Haru Oni”, emplazado al norte de la zona de Cabo Negro de la Región de Magallanes, producirá HV a partir de la electrólisis del agua realizada gracias a energía eólica. El HV resultante será posteriormente combinado con CO2 capturado en primera instancia de desechos forestales y posteriormente de la atmósfera para la producción de combustibles sintéticos.

El proyecto contempla la construcción y operación de plantas conocidas como “power-to-X”, que ocupan ERNC, agua y CO2 para producir combustibles sintéticos carbono neutrales. Para el proceso de electrólisis, el proyecto de HIF ocupará la tecnología PEM. Para la elaboración de combustibles se agregan dos reactores, uno para la producción de metanol y otro para la producción de e-gasolina con tecnología MTG.

La Figura 5 resume los procesos productivos asociados al proyecto de HIF. El primer proceso corresponde a la desalación del agua extraída del mar utilizada en el proceso de electrólisis. Esta etapa del proceso será necesaria una vez se inicie la fase Cabo Negro ya que el piloto “Haru Oni” obtendrá agua potable o de pozo. Luego, la electricidad producida por el viento alimenta el proceso de hidrólisis del agua, mediante un electrolizador que separa el hidrógeno del oxígeno. Paralelamente, se captura CO2 desde fuentes inevitables o desde el aire, a través del proceso DAC que utiliza la electricidad de los aerogeneradores. A continuación, CO2 e hidrógeno se sintetizan en un reactor para producir metanol, el que contiene un 37% de agua. El metanol producido se destila, llegando a niveles de agua de 4 a 6%, con los que este compuesto puede ser directamente comercializado o bien procesado nuevamente en un reactor de MTG para la obtención de e-gasolina. En esta última reacción se obtienen gases residuales que pueden ser transformados en gas licuado verde o e-GLP.

Figura 5: Diagrama productivo HIF


Energía Renovable
Planta de Metanol y Metanol a Gasolina (MtG)
Transporte
Suministros CO_2 del aire
CO_2
CO_2
Electrolizador
CH_2OH
Síntesis de metanol
H_2
Magallanes, Chile
Agua
Planta MtG
e- Metanol
e- Gasolina

Fuente: Declaración de Impacto Ambiental HIF (2020).

El proyecto parte con un plan piloto que cuenta con una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) aprobada.[44] Este se emplaza en un terreno de 5,7 hectáreas en la comuna de Punta Arenas, en el que se instala una planta de electrólisis y un reactor para sintetizar metanol. A un costado de la planta se emplaza un aerogenerador de una potencia máxima de 3,4 MW, a partir del cual se obtendrá la energía para operar el electrolizador. Para la operación de la planta piloto se utilizará como insumo agua potable o de pozo, mientras que para las etapas futuras se considerará usar agua de mar, la cual será desmineralizada a través de una planta desalinizadora.

Para la fase inicial de este proyecto se contempla una inversión de US$51 millones. La planta piloto tendrá una capacidad de producción de 3,9 toneladas de metanol crudo al día (ton/día), equivalente a 1.400 toneladas al año de metanol. Si se destinara todo el metanol a la producción de gasolina, se podrá producir 600 m^3 de combustible sintético al año y 41 toneladas de e-GLP.[45] La planta piloto entrará en operación durante el cuarto trimestre de 2022.[46]

Para la construcción y el emplazamiento de la planta de electrólisis, reactor y aerogenerador de la planta piloto se crean alrededor de 250 puestos de trabajo. Cuando la planta entre en operación, se requerirán 4 operadores.

El proyecto contempla dos fases adicionales a la implementación de la planta piloto (ver Tabla 6). En paralelo a la operación del plan piloto, durante el año 2023 se iniciará la construcción de la Fase I HIF Cabo Negro, que contempla 320 MW adicionales de capacidad instalada de energía eólica y el escalamiento de todas las instalaciones de electrólisis y reactores. Completada la Fase I, se producirán 140 mil toneladas de e-metanol o 75 mil m^3 de e-gasolina y 5.100 toneladas de e-GLP.

La Fase II, que contempla la instalación de tres trenes, está planificada preliminarmente para el año 2025. Esta fase incorpora 7.500 MW de capacidad instalada adicional de energía eólica, 2.500 MW por cada tren. Con dicha capacidad se espera producir cerca de 2,5 millones de m³ al año de combustible sintético, además de 166 mil toneladas de e-GLP. A modo de referencia, la e-gasolina que se producirá representa del orden de un 40% del consumo actual de gasolina en el mercado nacional.[47]

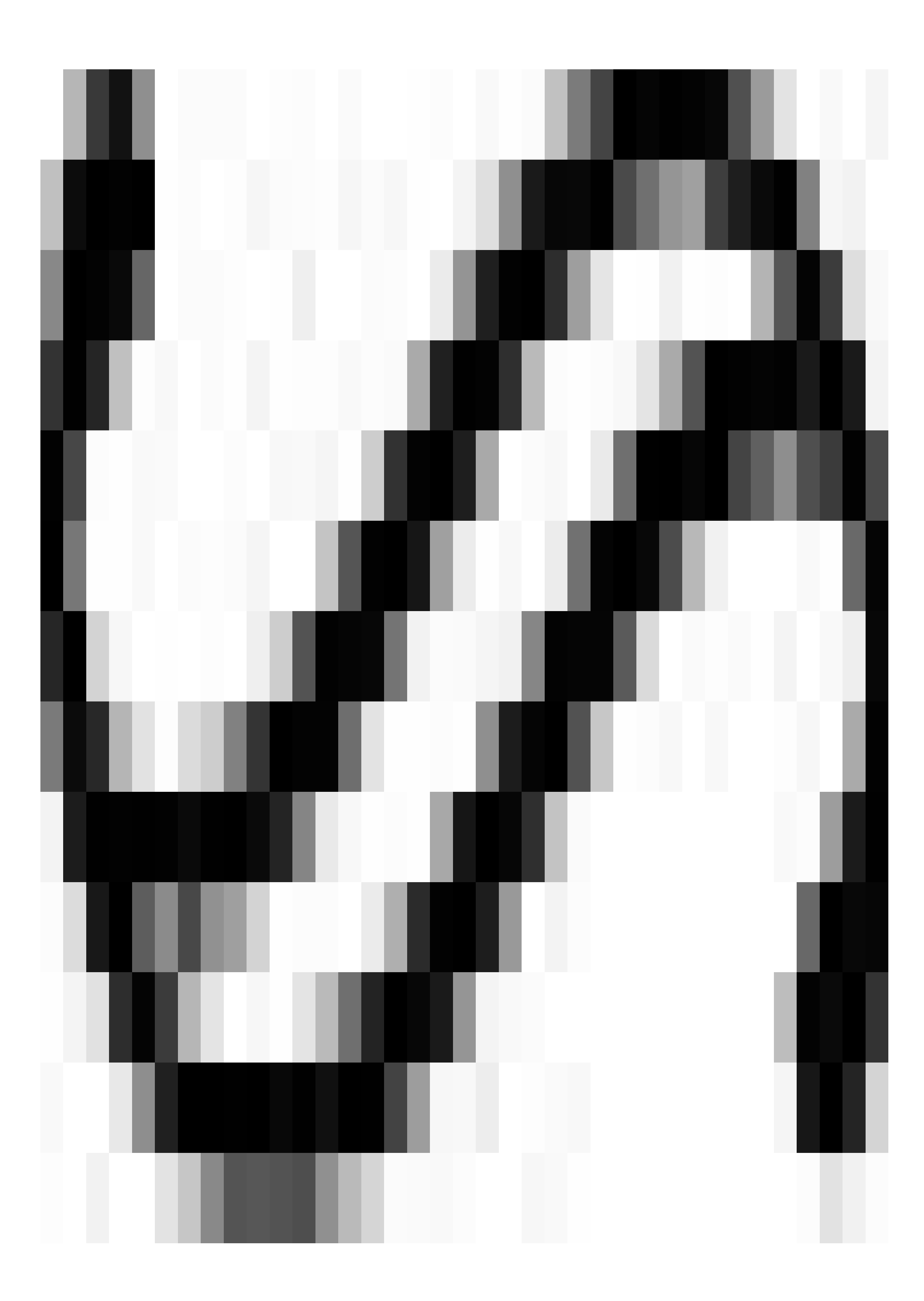
Tabla 6: Detalles del proyecto

Etapas/Fases	Unidad	Piloto "Hari Oni"	Fase I "Cabo negro"
Construcción	Año	2021-2022	2023-2025
Operación	Año	2022	2025
Características			
Capacidad instalada	MW	3,4	320
Generación eléctrica	GWh/año	16,5	1.600
Consumo de CO_2	Toneladas/año	2.000	195.000
Hidrógeno producido	Toneladas/año	330	32.000
Productos finales			
e-Metanol producido	Toneladas/año	1.400	140.000
e-Gasolina producida (*)	m³/año	600	75.000
e-Gas licuado (*)	Toneladas/año	40	5.100

Fuente: Elaboración propia.

(*) Asumiendo todo el metanol a gasolina.

4. Impacto del desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Magallanes, 2021-2050



4.1 Caracterización de la región de Magallanes

48

La región de Magallanes tiene una población de 179.949 personas, que representa sólo un 0,92% de los habitantes del país.[49] Se emplaza entre las latitudes sur 48°36’ y 56°30’, a más de 3.000 kilómetros de Santiago. La conectividad de la región con el resto del país se encuentra limitada al transporte aéreo y marítimo.

El 82% de la población de la región de Magallanes se emplaza en la comuna de Punta Arenas, ciudad que se fundó en 1848 buscando reforzar la soberanía del país en la zona sur. Uno de los hechos más relevantes para el desarrollo económico de la región fue la irrupción de la industria petroquímica a partir de 1945, cuando ENAP inició las actividades de producción de petróleo y GN en la región. Esta producción, que permitió extraer volúmenes anuales máximos de 8.000 millones de m^3 de GN en 1970 y 2,48 millones de m^3 de petróleo crudo en el año 1982, se ha hecho cada vez más costosa y escasa.[50] Al 2020, los volúmenes de extracción se han reducido a 1.290 millones de m^3 de gas natural y 114 mil m^3 de petróleo, lo que alcanza únicamente para el abastecimiento parcial de las necesidades locales.[51]

Además de ENAP, el otro gran actor petroquímico de la región es Methanex, empresa privada que construyó cuatro grandes instalaciones modulares para la producción de metanol, a partir de GN proveniente de Argentina. Esta compañía se instaló en el año 1988 y realizó su última expansión en el año 2004, fecha que coincide con el inicio de las restricciones al suministro de gas argentino. Aunque el proyecto no tuvo el alcance originalmente previsto, su desarrollo permitió mejoras en la infraestructura portuaria e industrial de la región que podrán ser aprovechadas en el desarrollo del HV.

Es menester mencionar que Argentina, que presentaría un potencial eólico similar al de Magallanes en su Patagonia, no ha presentado a la fecha una estrategia nacional para desarrollar la industria del HV, pero eventualmente podría convertirse en un actor relevante en este mercado.

En los últimos años, la industria del turismo ha experimentado un desarrollo basado en la afluencia de extranjeros que visitan Puerto Natales y el Parque Nacional Torres del Paine, además de los pasajeros de cruceros que transitan desde Punta Arenas hacia la Antártica. El turismo genera un 9% del empleo[52] y un 10% de la actividad económica regional.[53] Finalmente, y a partir del año 2005, la industria salmonera se incorporó a la matriz productiva regional, representando en torno al 4% de la actividad económica de Magallanes.[54]

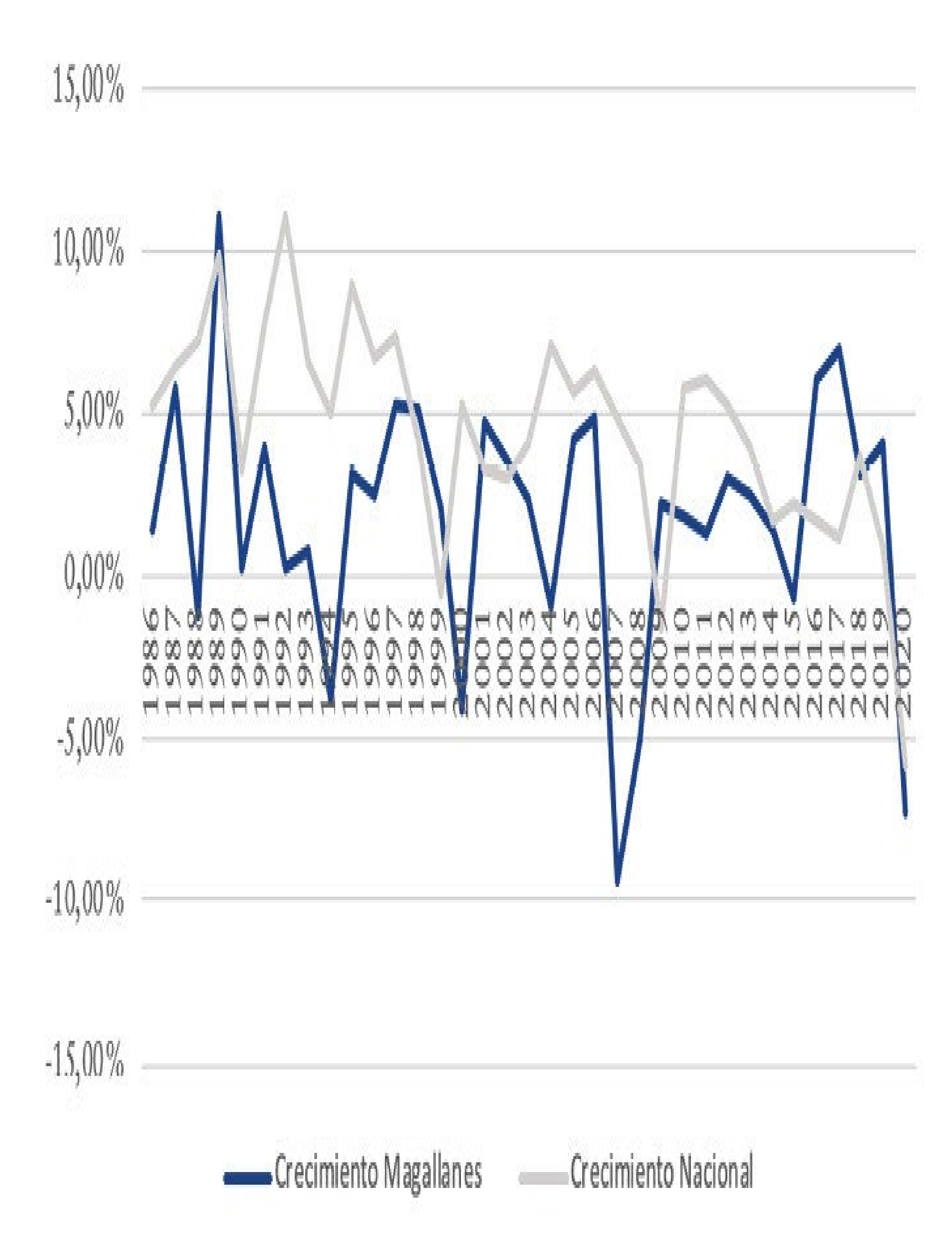
El desarrollo económico de estas industrias ha permitido que Magallanes sea una de las regiones con mejores indicadores socioeconómicos de Chile. De acuerdo con datos de la encuesta CASEN 2020, levantados entre septiembre de 2020 y febrero de 2021, Magallanes es la segunda región con mayor ingreso por habitante del país, solo superada por la región Metropolitana, con un ingreso por hogar que es 16% superior al promedio nacional. Asimismo, la región de Magallanes tiene el menor índice de pobreza del país (5,7% versus 10,8% a nivel nacional), la menor tasa de analfabetismo y la segunda tasa de desocupación más baja del país. Se trata sin duda de una región que se encuentra en un estado general de desarrollo superior al resto del país.

En lo que respecta a emisiones de GEI, la región es carbono negativa, es decir, captura más toneladas de CO2 que las que emite. Esto se debe principalmente a las tierras forestales de Magallanes, que absorben en torno a 11,2 millones de toneladas de CO2 al año, las que más que compensan las 2,4 millones de toneladas liberadas en la región.[55] En términos de emisiones brutas, Magallanes es la región que más toneladas de CO2 emite por habitante, con 13 ton CO2/habitante, cifra un 35% superior al promedio nacional de 9,6 ton

CO2/habitante. Lo anterior se explica por el uso intensivo del GN para calefacción, cuyo precio se encuentra altamente subsidiado.

La falta de conexión física de Magallanes con el resto del país, unida a una actividad económica concentrada en pocas industrias, hace que la región presente indicadores económicos que parecen independientes de la realidad general del país, como de hecho se demuestra en la ausencia de relaciones estadísticas estables entre las variables económicas regionales y nacionales.[56] A modo de ejemplo, esta región no sufrió impacto alguno en producto y empleo durante la crisis financiera global (entre mediados de 2008 y mediados de 2009) como sí ocurrió en el resto de Chile. Magallanes tampoco vivió los efectos iniciales de la crisis social de 2019, creciendo en 2019 a una tasa de 4,1% mientras el país lo hacía al 0,9%. Como contrapartida, enfrentó su propia contracción en el año 2007 por las restricciones de GN argentino (y la subsecuente caída en la producción de metanol) y en el año 2015 por la crisis que afectó al sector salmonero. Con estos antecedentes se proyectará la línea base sobre la cual se podrá evaluar el impacto que estimamos genere el HV en la región.

Figura 6: Crecimiento del PIB Nacional y regional de Magallanes, 2000-2020


15,00%
10,00%
5,00%
0,00%
-5,00%
-10,00%
-15,00%
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Crecimiento Magallanes
Crecimiento Nacional

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Banco Central.

4.2 Estimación de la línea base

La línea base corresponde a un escenario sin el desarrollo de la industria del HV en Magallanes. Esta se proyecta a partir de regularidades históricas, teniendo en consideración aspectos relevantes de la región, como el conjunto acotado de industrias, la presencia relevante del sector público y su dinámica relativamente independiente respecto de la del resto del país. Para ello se utilizan modelos de series de tiempo que consideran parámetros autorregresivos y tendenciales, donde, en algunos casos, las tasas de crecimiento se ajustan para incorporar futuros cambios probables en algunas variables de interés (por ejemplo, una menor producción de metanol por agotamiento de las reservas de GN).

La Tabla 7 da cuenta de la metodología utilizada en la proyección de la línea base para el período 2021-2050. En el Anexo 3 (Estimación de la línea base) se caracterizan en detalle las variables utilizadas para la línea base y los procedimientos econométricos empleados para realizar las proyecciones correspondientes.

Tabla 7: Variables, fuentes de datos y metodologías de estimación de la línea base

Variable	Fuente datos históricos/período	Metodología
PIB	Banco Central / 1986-2020	Modelo economé
Empleo	Instituto Nacional de Estadísticas / 1986-2020	Modelo economé
Exportaciones	Banco Central y Aduanas / 2010-2020	Estimación con te
Emisiones	Ministerio del Medio Ambiente / 1990-2018	Cálculo de las em

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Escenarios para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Magallanes

A partir de la información disponible de los proyectos de HV en Magallanes descritos en el capítulo anterior, y del potencial exhibido por la región, se modelaron tres escenarios diferentes para estimar el impacto del desarrollo de la industria del HV en la región.

Escenario HIF

Corresponde a la materialización del proyecto HIF bajo las condiciones que se han expuesto. Ello considera, además del piloto “Haru Oni”, la Fase I Cabo Negro y la Fase II, con la instalación progresiva de 7.820 MW de generación eólica entre los años 2025 y 2040. El HV producido en este escenario será utilizado para la elaboración de e-gasolina y de e-GLP. Nuestro modelo asume que la e-gasolina producida es exportada en su totalidad a un precio inicial de US$1,5/lt a los off takers que participan en el proyecto, convergiendo gradualmente a un precio de US$1/lt al año 2050. En el caso del e-GLP, se modela su venta en el mercado local a un precio inicial de US$800/ton, específicamente a hoteles dispuestos a pagar un sobreprecio por energía carbono neutral, precio que convergería gradualmente a US$500/ton hacia el año 2050.

Escenario HIF + Industria HV (Escenario Conservador)

En este escenario se considera la instalación del proyecto HIF, en sus Fases I y II, y del 50% de la capacidad productiva de los proyectos HNH Energy, H1

Magallanes, Selknam y Total Energy. Cabe destacar que los autores han constatado directamente, a partir de reuniones sostenidas en Punta Arenas con autoridades locales, autoridades universitarias, inversionistas y autoridades nacionales, que los proyectos que se consideran en este escenario tienen alta probabilidad de materializarse. Se asume en este escenario que toda la capacidad instalada por los proyectos distintos de HIF se usa para la producción y posterior exportación de amoniaco verde a un precio inicial de US$400/ton, el cual converge gradualmente a US$300/ton hacia el año 2050. Los valores anteriores permitirían mantener una oferta competitiva en relación a la alternativa tradicional.

Escenario HIF + Industria HV (Escenario Optimista)

Este escenario considera la materialización del proyecto HIF en sus Fases I y II y el desarrollo en su totalidad de los proyectos HNH Energy, H1 Magallanes, Selknam y Total Energy. Se asume en este escenario que la capacidad adicional instalada de HIF se utilizará para la elaboración de e-gasolina y de e-GLP, mientras que la de todos los demás proyectos es utilizada íntegramente en la fabricación de amoniaco verde para ser comercializado en mercados internacionales bajo las mismas condiciones descritas en el Escenario Conservador.

Existen dos metodologías para presentar la distribución probabilística de escenarios futuros. La primera es a través de una función de distribución continua de probabilidades, que queda reflejada en gráficos en forma de abanico (fan chart), como los presentados por los bancos centrales para sus proyecciones de variables macroeconómicas. Cuando la densidad de información es más escasa o envuelve juicios subjetivos, la segunda metodología consiste en identificar solo unos pocos escenarios, con probabilidades asignadas por los expertos, basados en sus juicios. En este libro se aplica este segundo enfoque metodológico.

La Tabla 8 presenta las características generales de los tres escenarios mencionados, a los cuales se asignó una probabilidad en función de la información disponible, de modo tal de generar un escenario central para nuestras estimaciones. Estimamos que la probabilidad del escenario en que se concreta únicamente la inversión de HIF es del 20%; del 50% en el que se concreta además de HIF, la instalación de la mitad de la capacidad productiva asociada a los demás proyectos; y del 30% en el que se materializa, además de HIF, los otros cuatro proyectos en su totalidad. Es menester mencionar que las probabilidades aquí definidas dependen de la materialización del proyecto HIF que, los autores, estiman es muy alta para todas sus fases.

Tabla 8: Detalle de los escenarios modelados

Escenario	Proyectos incluidos
HIF	HIF Fase I y Fase II
HIF + Industria HV (Escenario Conservador)	HIF Fase I y Fase II más el 50% d
HIF + Industria HV (Escenario Optimista)	HIF Fase I y Fase II, de más de 10

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estimación de los impactos asociados al proyecto HIF y al desarrollo de la industria del hidrógeno verde

A continuación, se estiman los impactos productivos, económicos, laborales, medioambientales y de capital humano e I+D asociados al desarrollo de la industria del HV en Magallanes. Como se detalla en la Tabla 9, se presenta un análisis cuantitativo para la gran mayoría de los efectos estimados. Las variables económicas se proyectan en moneda de 2021, es decir, en términos reales.

Tabla 9: Estimaciones de impacto según tipo de variable y de análisis

Tipo de Variable	Variable	Análisis
Productiva	Capacidad eólica	x
Generación eléctrica ERNC	x	
Producción de HV	x	
Producción de e-gasolina	x	
Producción de e-GLP	x	
Producción de Amoniaco Verde	x	
Desalación de agua	x	
Económica	Exportaciones	x
Ventas en mercado nacional	x	
PIB	x	
Inversión	x	

Laboral	Empleo temporal - Construcción	x
Empleo temporal - Otros	x	
Empleo permanentes directos	x	
Empleo permanentes indirectos	x	
Medioambientales	Ahorro en emisiones	x
Descarga de salmuera	x	
Impactos durante la construcción		x
Impactos durante la operación		x
Capital Humano e I+D	Técnicos, profesionales y científicos	x
Formación universitaria y CFT		x
Capcidad e I+D		x

Fuente: Elaboración propia.

Los impactos asociados a la industria del HV se estiman considerando las características de cada uno de los proyectos y su desarrollo temporal, distinguiendo entre los períodos de construcción y operación de largo plazo. Cada uno de los impactos se estima considerando los rendimientos técnicos de los recursos involucrados, en conformidad a lo que se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10: Elementos generales de la estimación de impactos directos

Variable
Instalación de aerogeneradores, electrolizadores y plantas de producción de coml
Inversión
Generación
Producción combustible
Precios
PIB
Empleo directo e indirecto
Emisiones
Salmuera

Fuente: Elaboración propia, ver detalle de cada metodología en el Anexo 4.

*Kwel = unidad de medida de capacidad de electrolización.

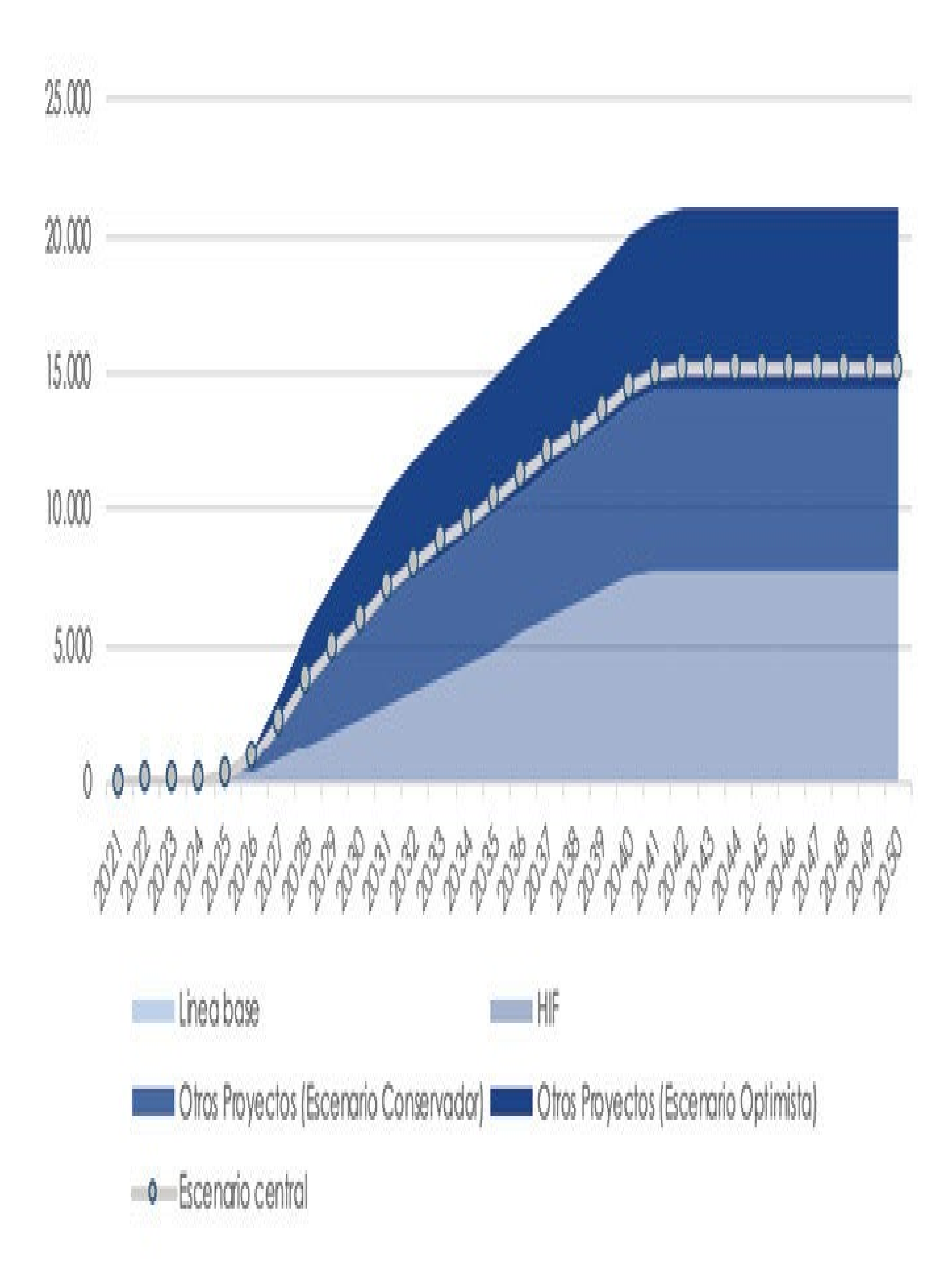
4.4.1 Hidrógeno verde y otras variables productivas

Capacidad eólica instalada

El proyecto HIF contempla la instalación de 7.820 MW de capacidad eólica al 2040, multiplicando 600 veces la capacidad actual de energía eólica de la región, que es de 12,9 MW. De concretarse los otros proyectos aquí considerados, la capacidad eólica de Magallanes llegará a 14 mil MW (escenario conservador) o a 21 mil MW (escenario optimista), siendo nuestro escenario central una capacidad eólica instalada de 15 GW al 2050 (ver Figura 7). Como referencia, la capacidad de generación eólica nacional es actualmente de 3.200 MW, por lo que, en nuestro escenario central, Magallanes cuadruplicará la capacidad eólica nacional actual. Es menester mencionar que se asumió gradualidad en la instalación de los proyectos de gran envergadura, definiéndose un límite de 516 MW año a ser instalados. A modo de contexto, 500 MW de capacidad eólica equivale a la instalación de 147 aerogeneradores. De esta forma, se contempla la instalación de 5 mil aerogeneradores en un plazo de 30 años.[57]

Figura 7: Proyección de capacidad de generación eólica instalada en Magallanes, 2021-2050*

Cifras en MW



25.000
20.000
15.000
10.000
5.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

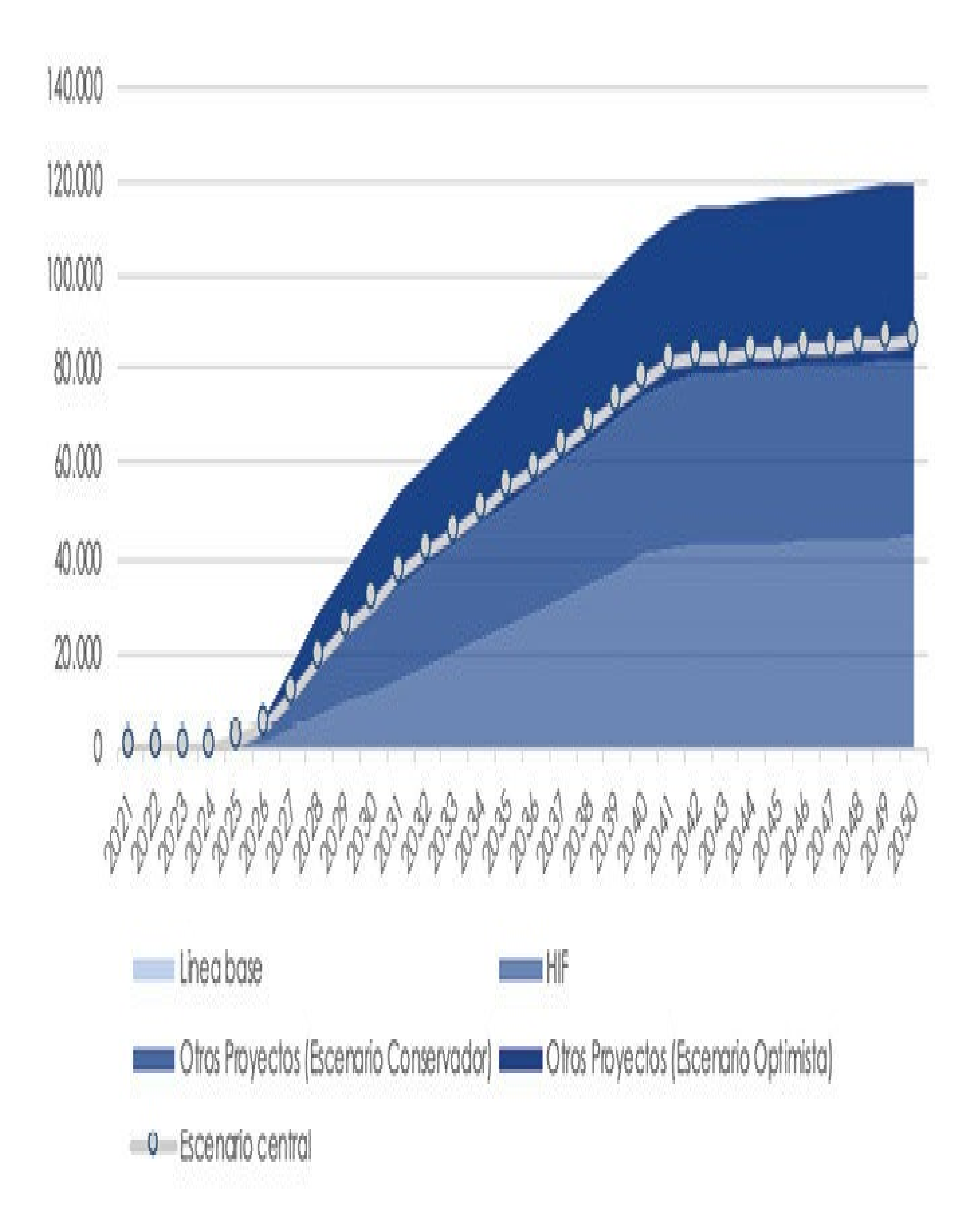
* En el escenario base se asume que la capacidad instalada permanece en los 12 MW actuales.

Generación eléctrica ERNC

En base a la capacidad instalada de energía eólica, se estima la generación de ERNC potencial que podrá producirse en Magallanes. Con la capacidad instalada actual, se pueden generar en promedio hasta 62 GWh en un año (ver Figura 8). Con el proyecto de HIF, la generación potencial se incrementará hasta los 44 mil GWh, multiplicando por 715 la generación potencial actual. La generación potencial casi se duplicará respecto del escenario con el proyecto de HIF, en caso de que se concreten los proyectos del escenario conservador, generándose hasta 82 mil GWh al año. En el escenario más optimista modelado, la generación eólica alcanzará 120 mil GWh al año, siendo nuestro escenario central una generación de 86 mil GWh al 2050. Es relevante destacar que la modelación de la generación eólica asume un factor de planta promedio creciente, que pasará del 55% hasta el 65%, en la medida que se concreten inversiones en los puntos con mejor viento de la región.

Figura 8: Proyección de generación eléctrica eólica de Magallanes, 2021-2050

Cifras en GWh



140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

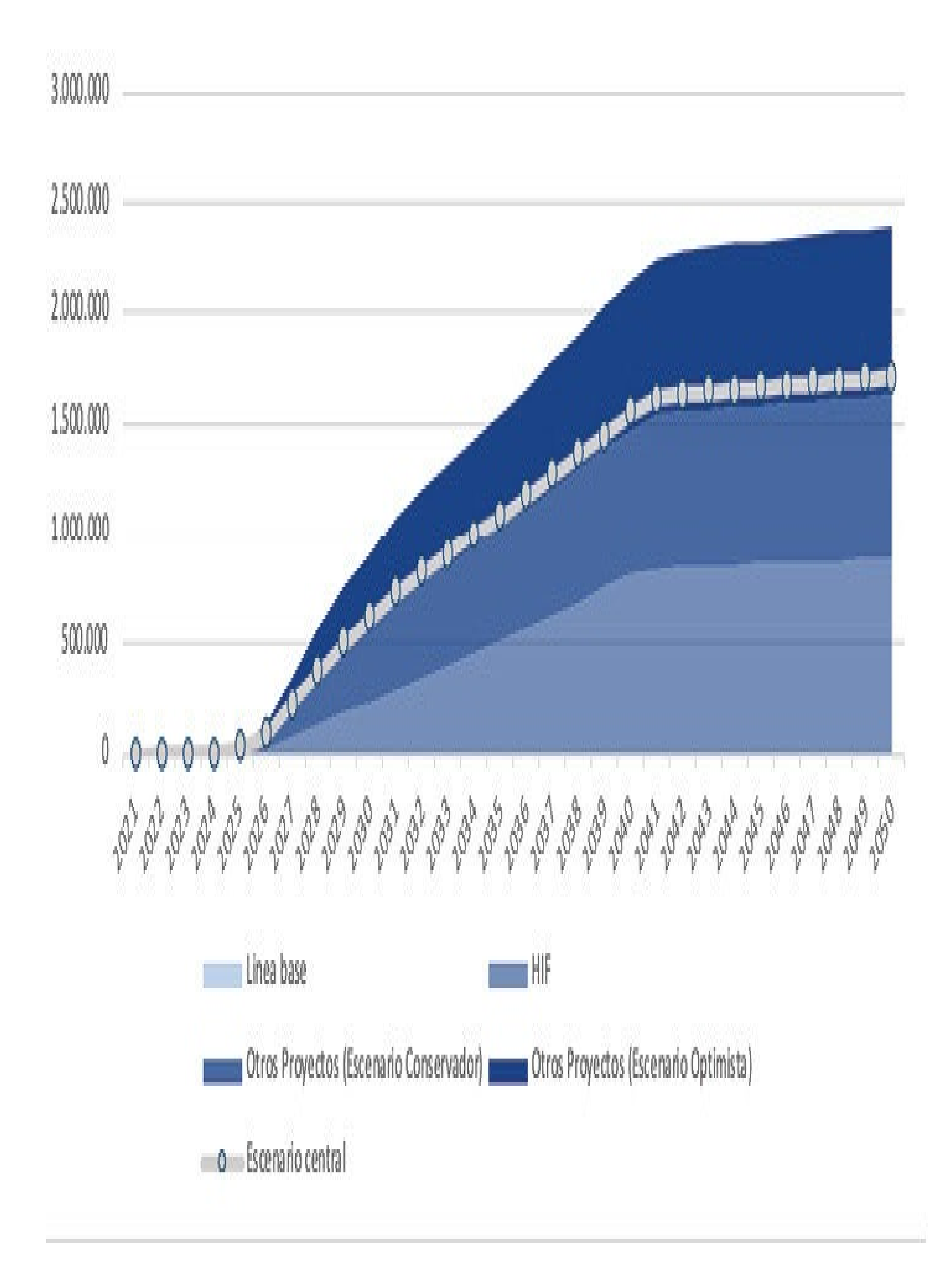
* En el escenario base se asume que la generación potencial permanece constante en 62 GWh.

Producción potencial de HV

Para la producción de un kilo de HV, se requiere de 50,07 kWh de energía eléctrica.[58] En base a este parámetro productivo y a la generación eléctrica potencial, se estimó la producción máxima de HV para cada uno de los escenarios modelados (ver Figura 9). De esta manera, se proyecta una producción potencial de 880 mil toneladas de HV asociadas al escenario HIF, las que se incrementarán hasta 1,6 o 2,4 millones de toneladas si se concretan los proyectos en los escenarios conservador y optimista, respectivamente, siendo el escenario central de nuestra estimación una producción anual de 1,7 millones de toneladas al 2050.

Figura 9: Hidrógeno Verde potencial producido en Magallanes, 2021-2050

Cifras en Toneladas


3.000.000
2.500.000
2.000.000
1.500.000
1.000.000
500.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

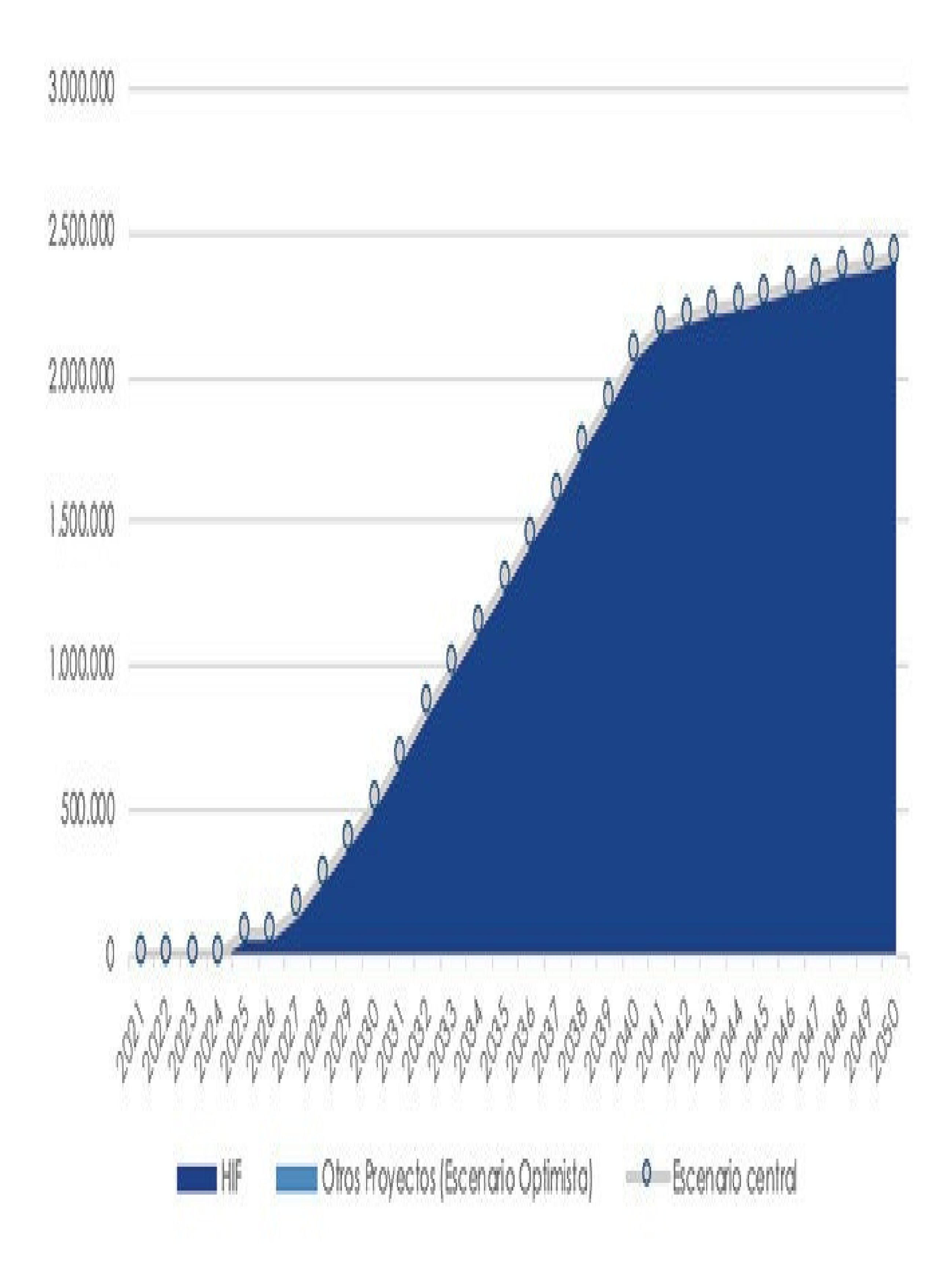
Fuente: Elaboración propia.

Producción potencial de e-gasolina

La e-gasolina, producida a partir del e-metanol, requiere de 11.532 kWh de energía por tonelada.[59] Dado que se requieren 2,6 toneladas de metanol para producir una tonelada de e-gasolina, el consumo eléctrico para la elaboración de este combustible sintético se estima en 29.984 kWh. En base a estos parámetros productivos, estimamos que se podrán elaborar hasta 2,4 millones de m³ de e-gasolina al 2050, todas asociadas al proyecto HIF, siendo este nuestro escenario central al 2050 (ver Figura 10).

Figura 10: E-gasolina potencial producida por HIF en Magallanes, 2021-2050

Cifras en Metros Cúbicos



3.000.000
2.500.000
2.000.000
1.500.000
1.000.000
500.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

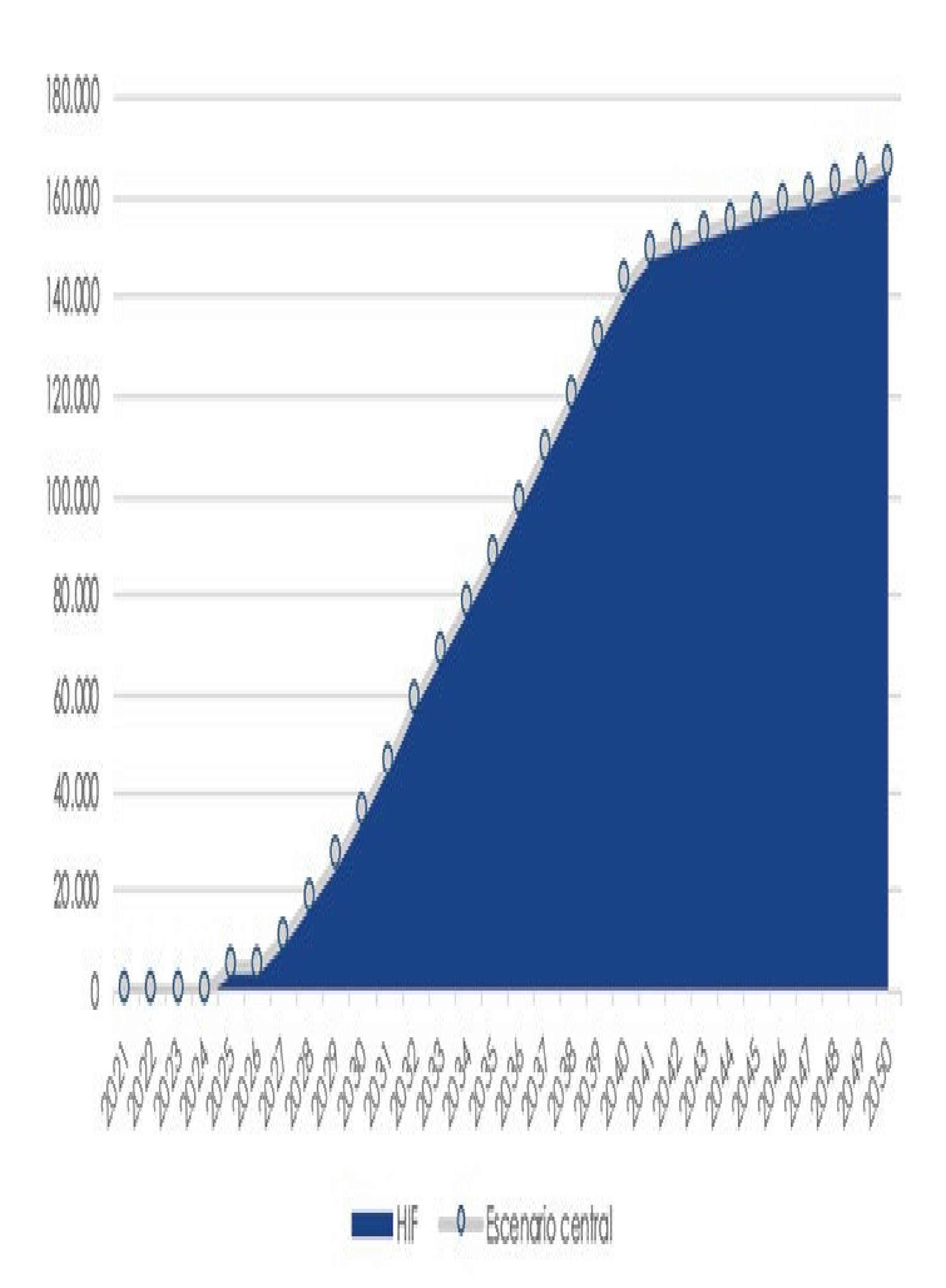
Fuente: Elaboración propia.

Producción potencial de e-GLP

El e-GLP es un subproducto obtenido en el proceso de elaboración de e-gasolina. Se estima que por cada tonelada de e-gasolina se puede obtener 0,07 toneladas de e-GLP. De esta manera se estima que a partir del proceso productivo de la e-gasolina de HIF se pueden llegar a obtener hasta 166 mil toneladas anuales de e-GLP en el escenario HIF, siendo este nuestro escenario central (ver Figura 11). Cabe señalar que no se contempla producción de GLP adicional a la del proyecto HIF.

Figura 11: E-GLP potencial producido por HIF en Magallanes, 2021-2050

Cifras en Toneladas



180.000
160.000
140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Escenario central

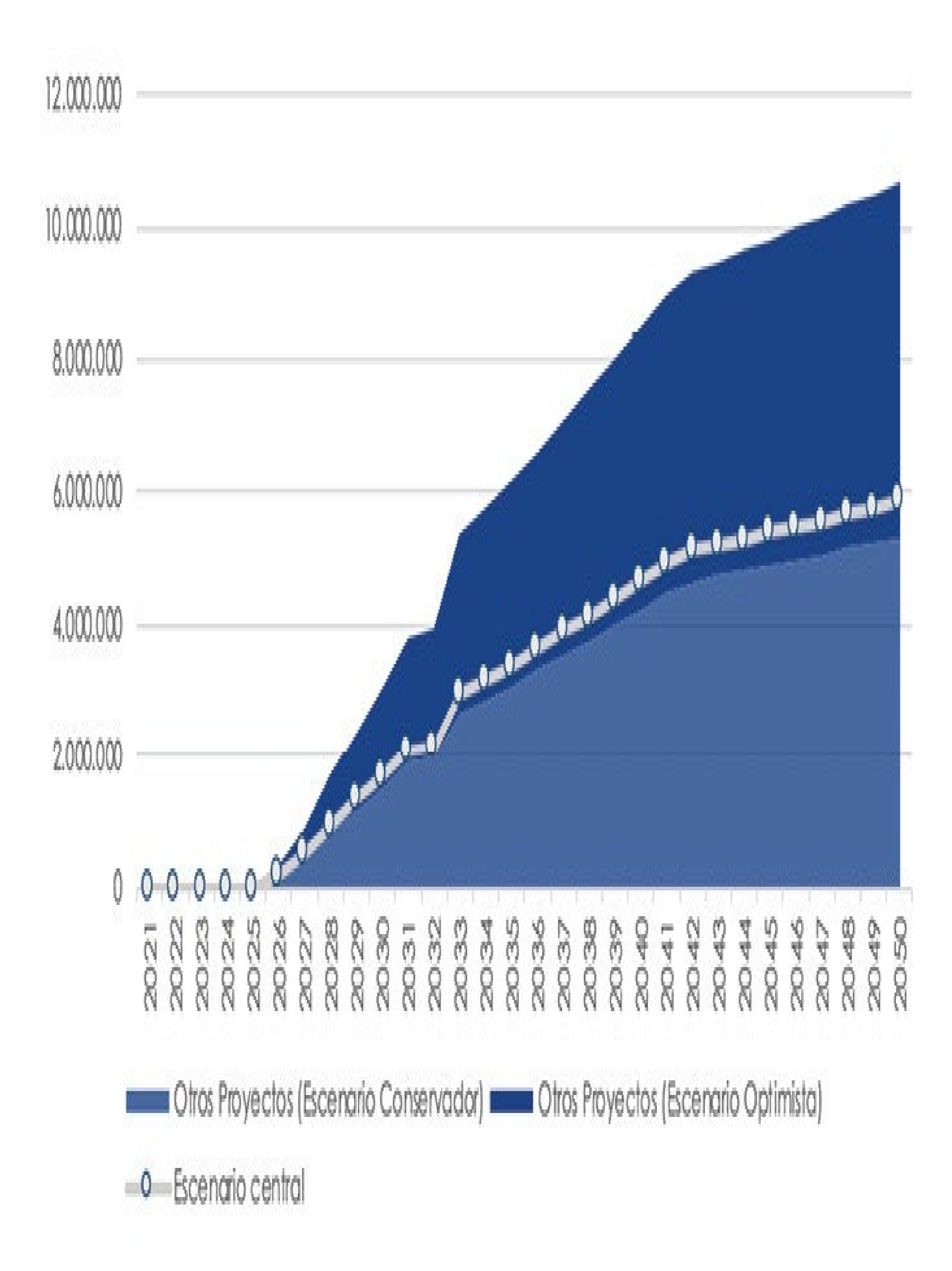
Fuente: Elaboración propia.

Producción potencial de amoniaco verde

Para producir una tonelada de amoniaco se requiere de 176,5 toneladas de HV. Se estima, por tanto, que la producción de una tonelada de amoniaco verde requiere de 9.690 kWh, consumo energético que incluye la electricidad requerida para la captura de nitrógeno del aire. En base a lo anterior, estimamos una producción potencial de amoniaco verde de 5,3 millones de toneladas al 2050 en el escenario conservador y de 10,7 millones de toneladas en el escenario optimista, siendo nuestro escenario central una producción de 5,9 millones de toneladas (ver Figura 12). Cabe destacar que la producción de Magallanes, en el escenario optimista, podría llegar a representar hasta el 7% de la producción actual de amoniaco mundial.[60]

Figura 12: Amoniaco verde potencial producido en Magallanes, 2021-2050

Cifras en toneladas



12.000.000
10.000.000
8.000.000
6.000.000
4.000.000
2.000.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

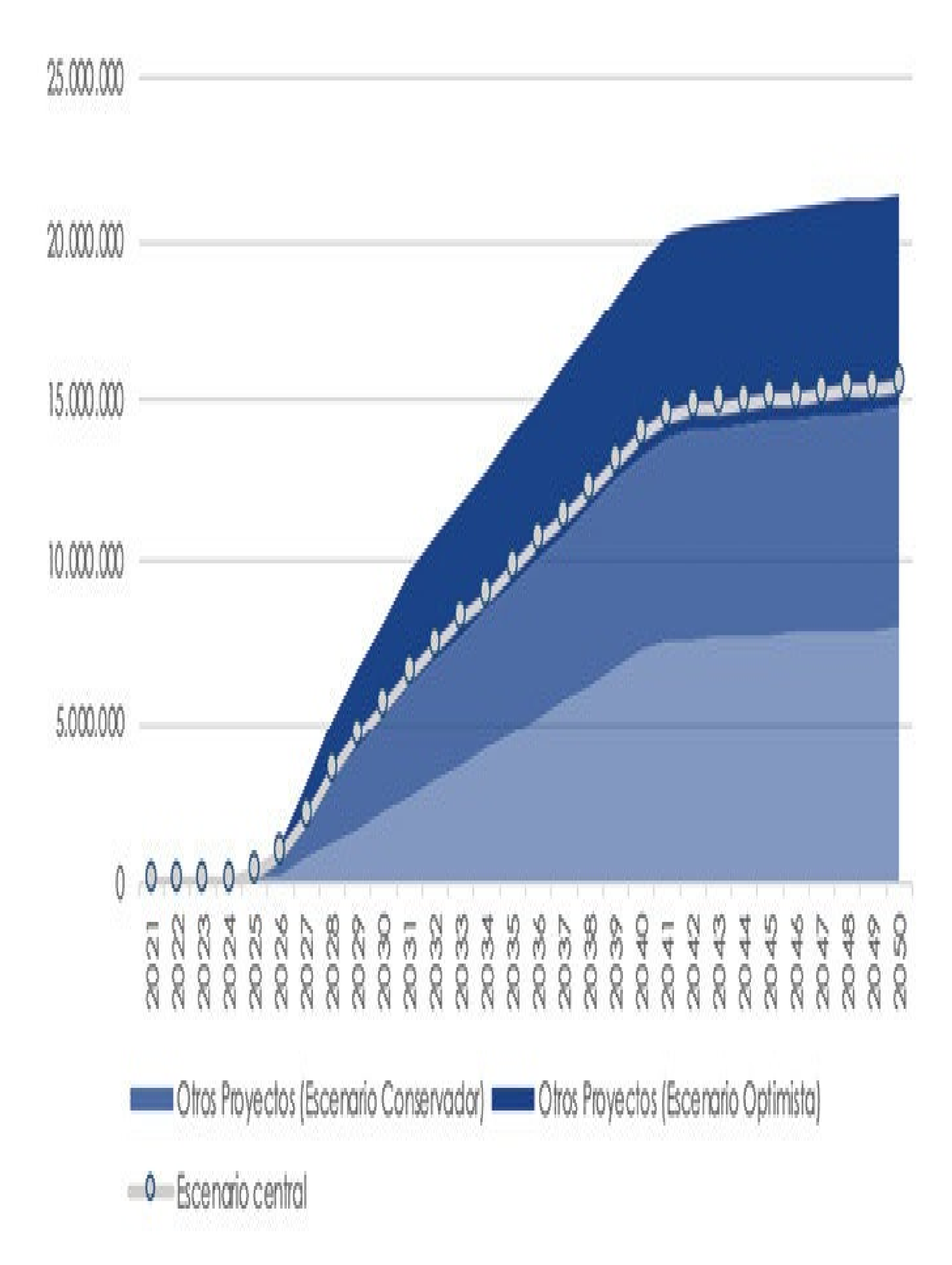
Fuente: Elaboración propia.

Desalación de agua

Para la producción de 1 kilo de HV, se requieren 9 litros de agua desalada.[61] Asumiendo que toda el agua utilizada en la producción de HV proviene del mar, se requerirá desalar 8 millones de m³ anuales para la producción de HV en el escenario HIF, cifra que se incrementará hasta 14,7 millones de m³ en el escenario conservador y a 20,7 millones de m³ en el escenario optimista (ver Figura 13). Nuestro escenario central contempla la desalación de 15,4 millones de m³ al año al 2050. A modo de contexto, Aguas Magallanes facturó 11,8 millones de m³ de agua potable en 2020, por lo que el consumo de agua desalada por los proyectos de HV en el escenario conservador sería un 30% superior a la demanda actual de agua potable en Magallanes.

Figura 13: Agua potencialmente desalada en Magallanes para la producción de HV, 2021-2050

Cifras en millones de metros cúbicos


25.000.000
20.000.000
15.000.000
10.000.000
5.000.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

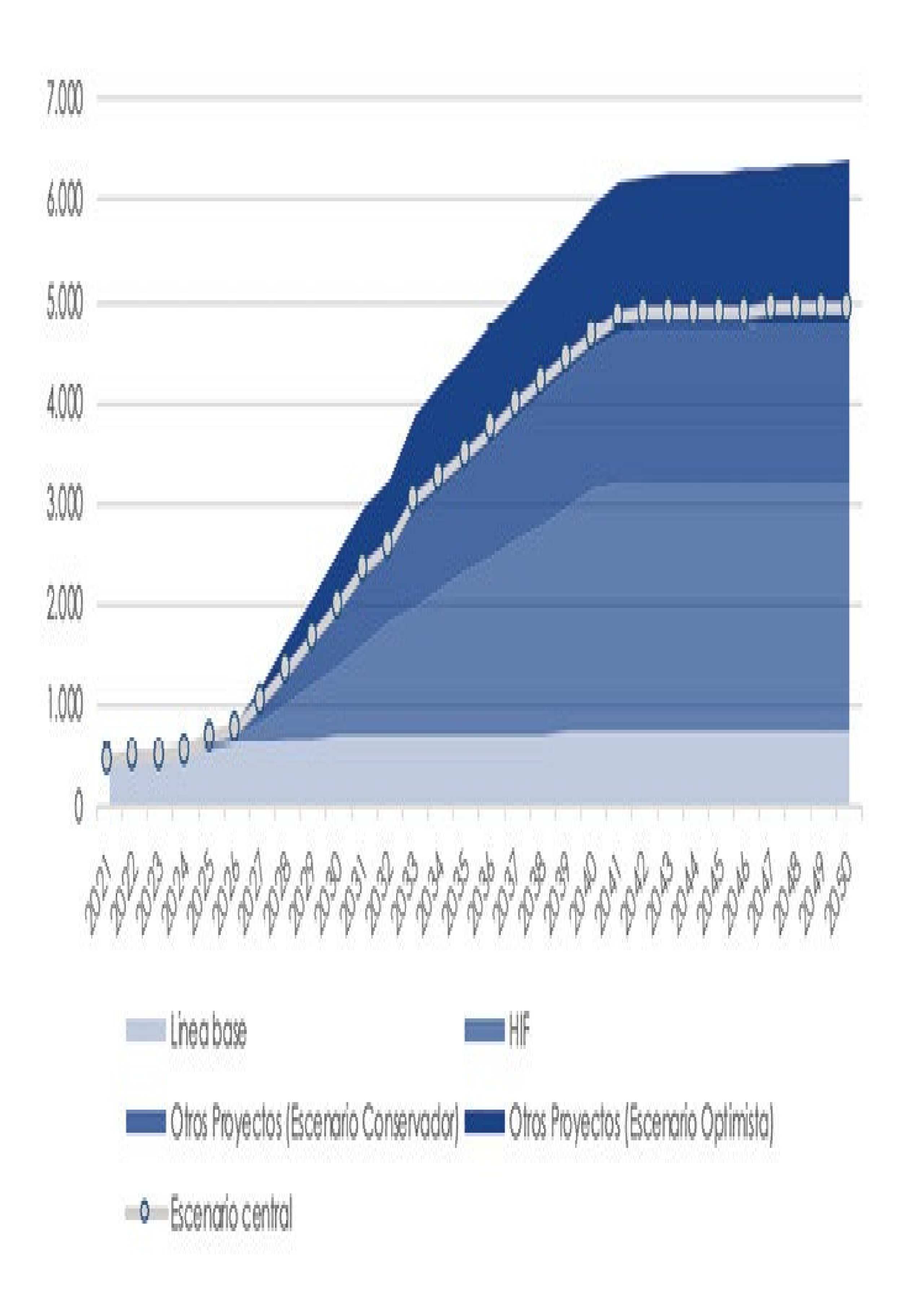
4.4.2 PIB regional y otras variables económicas

Exportaciones de derivados de HV

En el escenario base, sin el desarrollo de la industria del HV en Magallanes, proyectamos exportaciones por un valor de US$459 millones en el año 2021, las que crecerían 70% al 2050, llegando a US$770 millones (ver Figura 14). El desarrollo del proyecto de HIF implicará un incremento en las exportaciones por aproximadamente US$2.500 millones al 2050, asociados a envíos de e-gasolina. La materialización de los proyectos adicionales de HV considerados en el escenario conservador agregarán más de US$1.600 millones de dólares de exportaciones al 2050, asociados a envíos de amoniaco verde, mientras que, en el escenario optimista, se exportarían US$1.600 millones adicionales. En consecuencia, en el caso en que sólo se desarrolla el escenario HIF, las exportaciones de Magallanes al 2050 serán de $3.200 millones, el cuádruple de las exportaciones del escenario base; en el escenario conservador, las exportaciones de Magallanes alcanzarán US$4.800 millones al 2050 (6,3 veces las exportaciones del escenario base); y en el escenario optimista, las exportaciones de la región llegarán a US$6.400 millones (8 veces las exportaciones del escenario base). En el escenario central modelado, estimamos exportaciones cercanas a US$5 mil millones al 2050, las que multiplicarán por seis los envíos en el escenario sin industria del HV.

Figura 14: Exportaciones de la Región de Magallanes para distintos escenarios de desarrollo de la industria del HV, 2021-2050

Cifras en millones de dólares



7.000
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

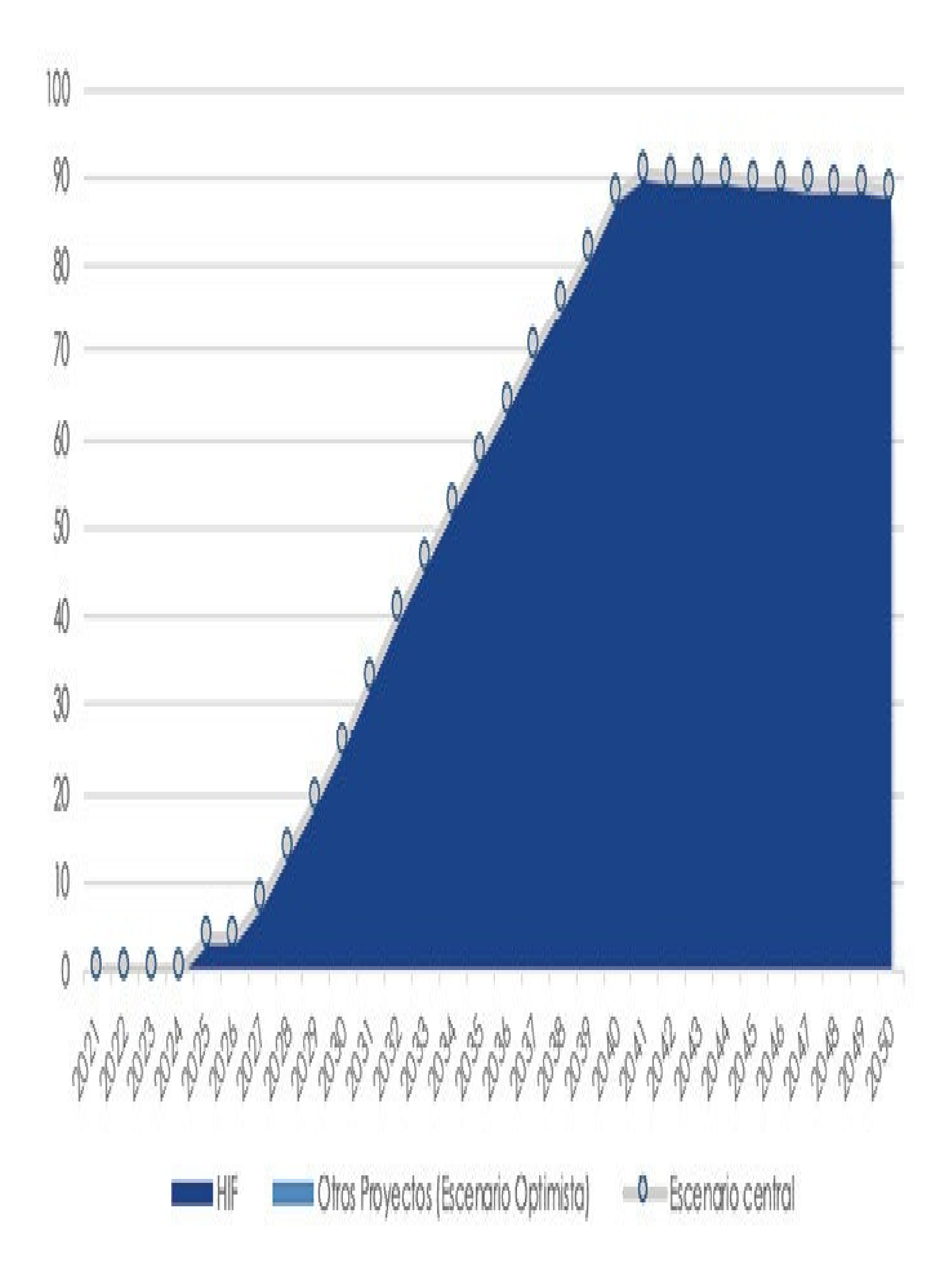
Fuente: Elaboración propia.

Ventas en el mercado nacional de derivados de HV

Las ventas para el mercado doméstico son de menor magnitud que las exportaciones e incluyen únicamente la comercialización del e-GLP producido por HIF. En el escenario HIF, proyectamos ventas de US$3 millones al 2023, las que se incrementarán gradualmente hasta US$90 millones de dólares al año 2040, manteniéndose estables hasta el 2050 (ver Figura 15). Este escenario asume que no se comercia en el mercado doméstico la e-gasolina producida por HIF, ni el amoniaco verde elaborado por los demás proyectos.

Figura 15: Ventas en el mercado doméstico de derivados del HV, 2021-2050

Cifras en millones de dólares



100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

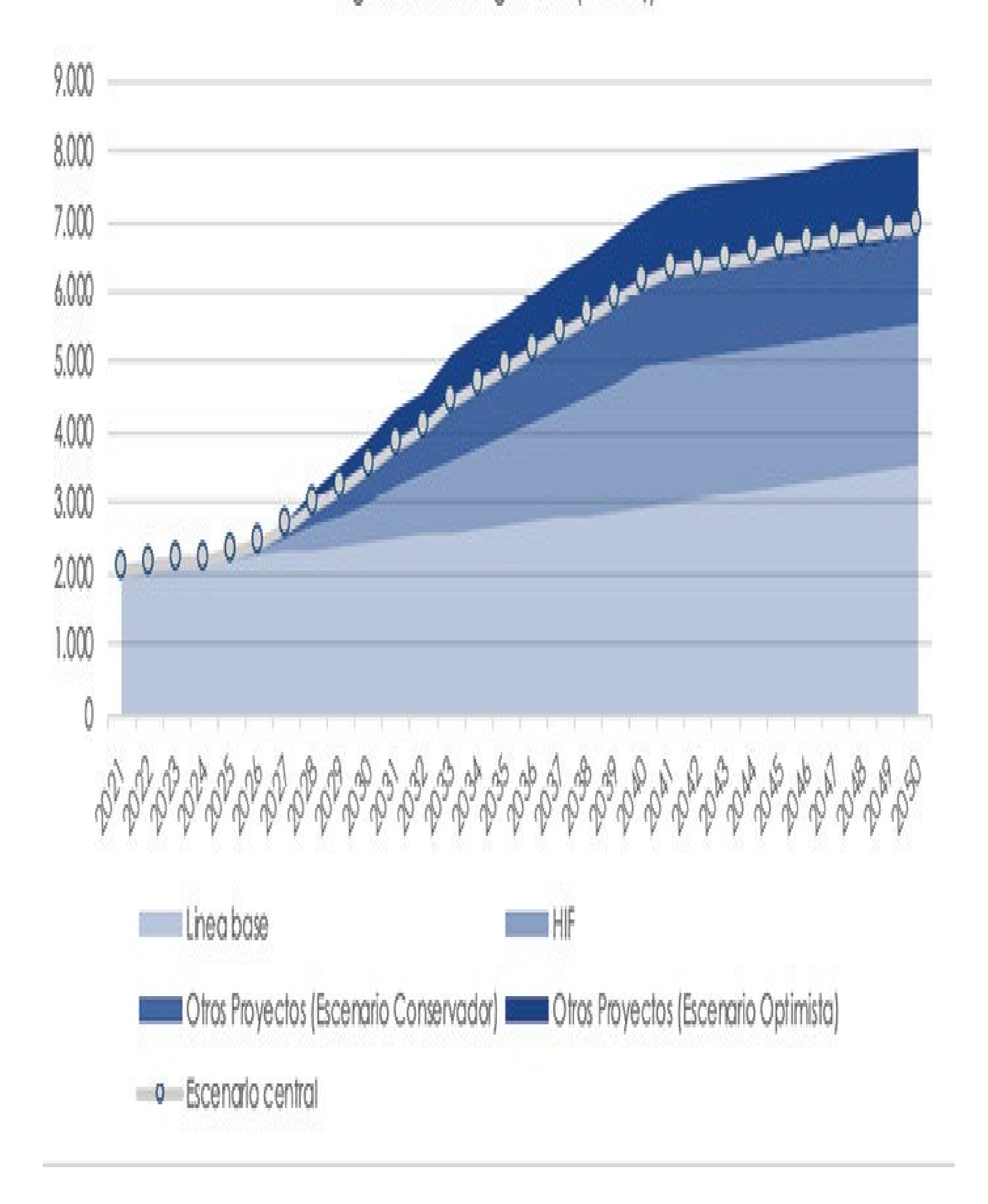
Fuente: Elaboración propia.

PIB de la Región de Magallanes

En el escenario base, estimamos un PIB de Magallanes de US$2 mil millones de dólares para el 2021, producto que se multiplicaría 1,7 veces al 2050 bajo un escenario en el que no se desarrolla la industria del HV en la región (ver Figura 16). Para el cálculo de la contribución del HV al PIB de la región, se estimó el valor agregado asociado a las ventas, tanto en el mercado doméstico como internacional, de los derivados del HV producidos en Magallanes. A partir de un análisis realizado con la matriz insumo producto de Chile, elaborada por el Banco Central, estimamos que el 79% de los ingresos de la industria del HV corresponderían a valor agregado.[62] De esta manera, estimamos que el escenario HIF aportará aproximadamente US$2 mil millones de dólares al PIB regional al 2050, equivalente al 96% del producto actual de la región y al 56% del PIB modelado en el escenario base al 2050. En el escenario conservador, en tanto, la contribución de la industria alcanzará cifras cercanas a US$3.200 millones de dólares al 2050, 160% del PIB actual y 91% del PIB base modelado al 2050. Por su parte, en el escenario optimista, la industria del HV contribuirá con más de US$4.500 millones al PIB de Magallanes, equivalente al 220% del PIB actual y al 127% del PIB base proyectado al 2050. Finalmente, en nuestro escenario base, estimamos una contribución en torno a US$3 mil millones al 2050, por lo que el PIB regional pasará de US$3.555 a más de US$6.900 millones.

Figura 16: PIB de la Región de Magallanes para distintos escenarios de desarrollo de la industria del HV, 2021-2050

Cifras en millones de dólares


Figura 17: PIB Magallanes (MMUS$)
9.000
8.000
7.000
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

Inversión de la industria del HV en Magallanes

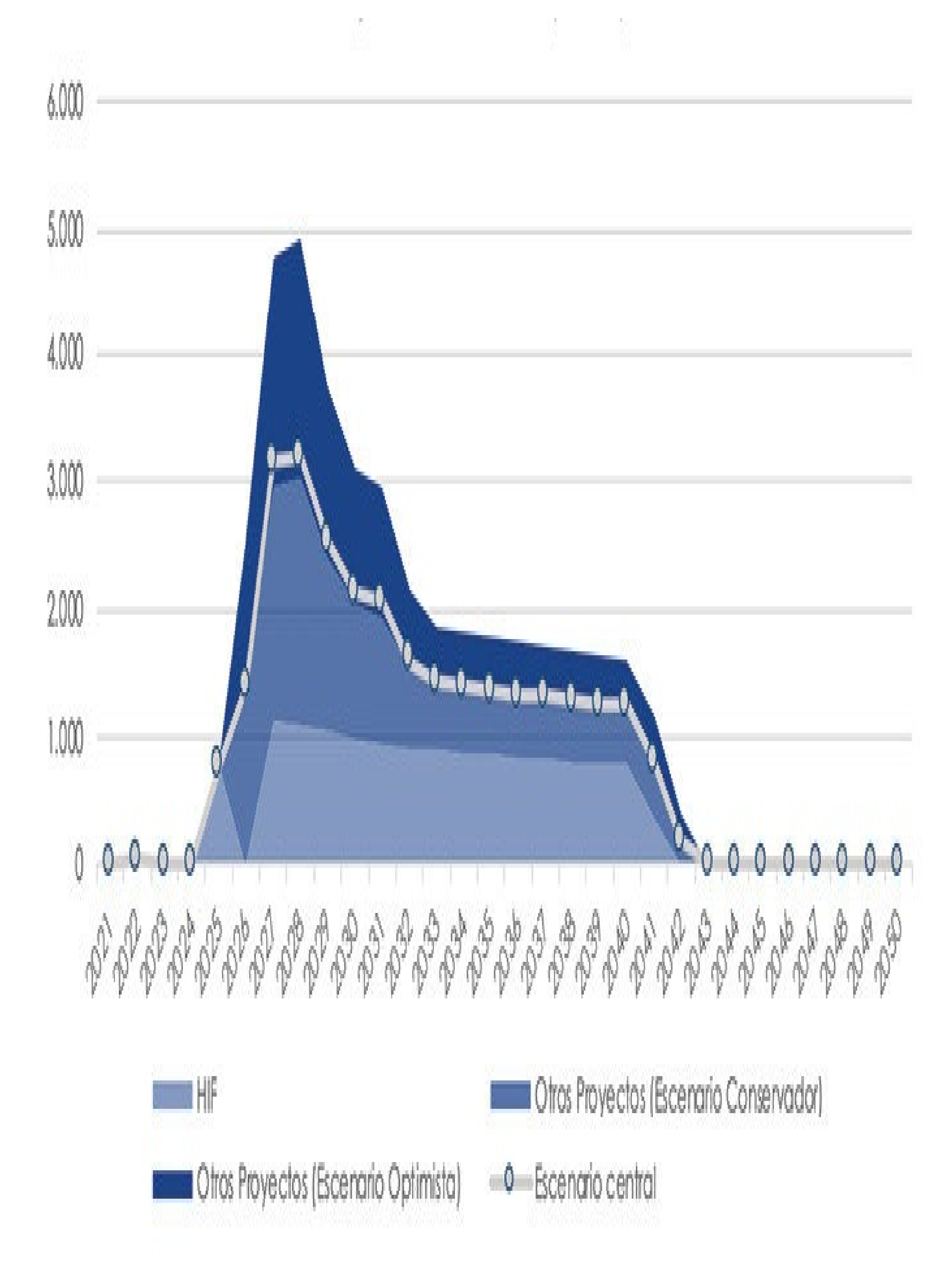
El proyecto HIF, en su plan piloto, contempla una inversión de US$45 millones y en su Fase I de US$1.500 millones. A ello se agregará la inversión asociada a la Fase II, la cual estimamos en US$13 mil millones, por lo que la inversión asociada al proyecto se encuentra en torno a US$15 mil millones, la cual se materializaría entre 2021 y 2040. Del total invertido, US$5 mil millones corresponderá a inversión en aerogeneradores y $10 mil millones a inversión en plantas productivas (reactores y otros) y electrolizadores, mientras que US$200 millones serán invertidos en plantas desaladoras. Por su parte, los proyectos de HV considerados en el escenario conservador supondrán una inversión adicional de US$12 mil millones entre 2021 y 2050, mientras que, en el caso del escenario optimista, se añadirán US$13 mil millones.

En ese orden de ideas, el escenario HIF supondrá una inversión total de US$15 mil millones en la región de Magallanes, cifra que equivale a 7 veces el PIB actual de la región (ver Figura 17). En el escenario conservador, estimamos que la industria del HV en su conjunto invertirá US$27 mil millones, 13 veces el producto actual de Magallanes. En el escenario optimista, en tanto, la inversión total asociada a la industria del HV llegará a US$40 mil millones, cifra que equivale a 20 veces el PIB actual de Magallanes. El escenario central modelado contempla una inversión acumulada de U$29 mil millones al 2050.

Figura 17: Inversión de la industria del HV en Magallanes,

2021-2050

Cifras en millones de dólares



6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

A la inversión directa de la industria del HV aquí estimada se podría agregar inversión adicional de carácter indirecto. Por ejemplo, en el escenario optimista, estimamos que se llegarán a exportar cerca de 400 mil TEU[63] al año, requiriéndose de inversión portuaria para poder realizar estos envíos, la cual estimamos en US$200 millones.[64] Asimismo, el desarrollo de la industria del HV podría dar espacio para la materialización de otras inversiones que busquen integrarse a la cadena productiva. Por ejemplo, en el escenario optimista, se instalarán más de 3 mil aerogeneradores en Magallanes, haciendo factible la instalación de una empresa que se dedique a la fabricación, al menos parcial, de los aerogeneradores en la región. Estimamos que la instalación de una fábrica de aerogeneradores supondría una inversión de entre US$100 y US$300 millones.[65]

4.4.3 Creación de empleos

En base a la capacidad productiva modelada en el apartado 4.4.1 y a factores de empleabilidad (FTE) asociados a la capacidad instalada y/o generada, se estimaron los empleos temporales y permanentes generados por la industria del HV en Magallanes.[66]

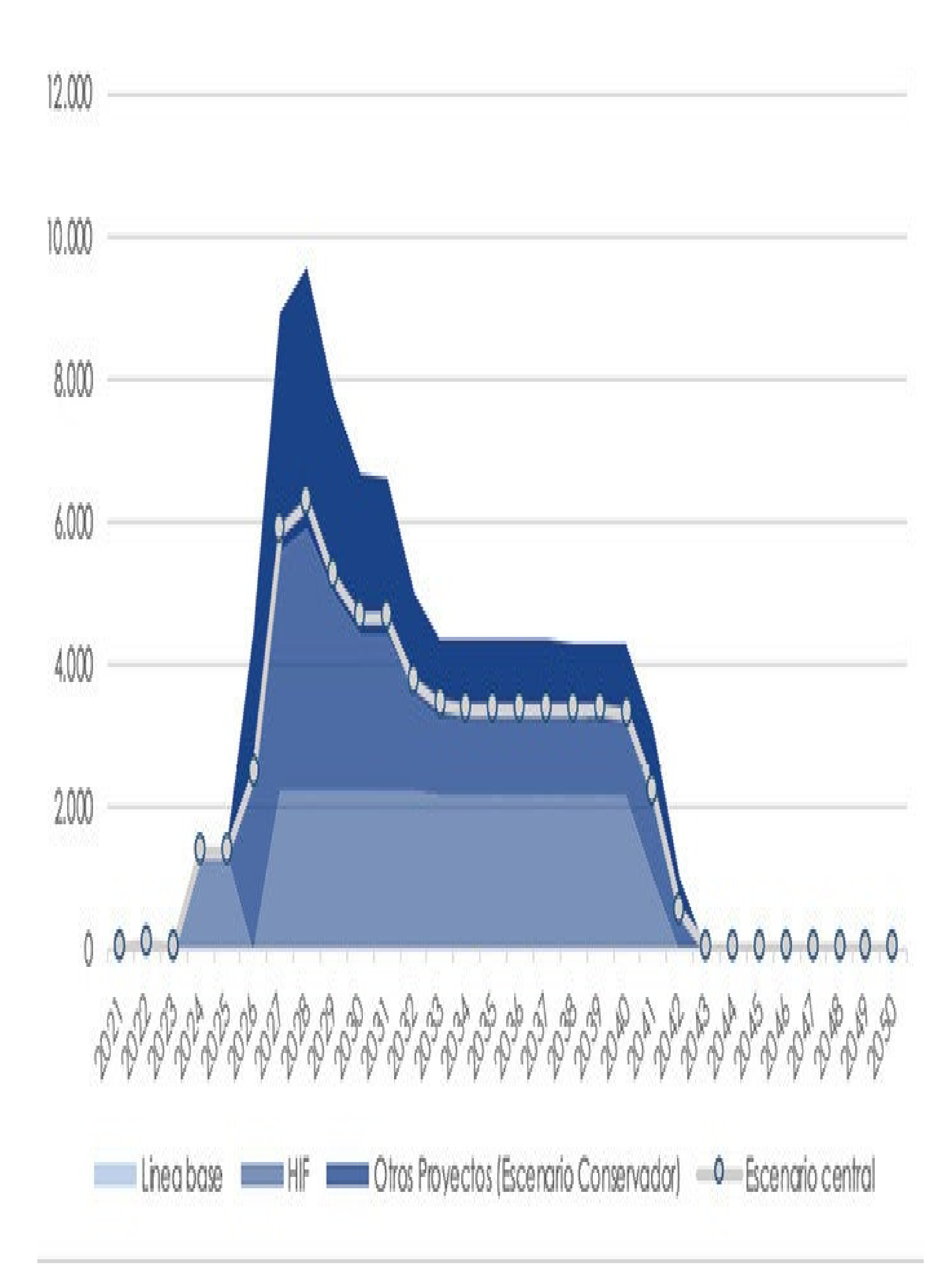
Empleo temporal[67]

Durante la etapa de construcción del proyecto HIF estimamos que se necesitarán en promedio 2.000 trabajadores durante el periodo 2024-2041, con un máximo de 2.200 en el año 2027 (ver Figura 18). En el escenario conservador se requerirá en promedio de 3.600 trabajadores para labores de construcción

durante el periodo 2024-2041, con un máximo de 4.500 trabajadores en el año 2030. En el escenario optimista, en tanto, estimamos que la industria del HV en Magallanes requerirá en promedio de 5.000 trabajadores para labores de construcción hasta el 2050, con una demanda máxima de 10.000 trabajadores el año 2028. En nuestro escenario central estimamos que se requerirá en promedio de 3.600 trabajadores durante el periodo 2024-2041, con una demanda máxima de 6.000 trabajadores el año 2028. A modo de contexto, la fuerza de trabajo actual en Magallanes es de 93.705 personas, por lo que los trabajadores requeridos durante el período 2024-2041 representarían el 4,1% de la fuerza de trabajo actual, respectivamente, mientras que el máximo de demanda requeriría del 6,7% de la fuerza de trabajo.

Figura 18: Empleo temporal asociado a la construcción, generado de manera directa por la industria del HV

Puestos de trabajo


12.000
10.000
8.000
6.000
4.000
2.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

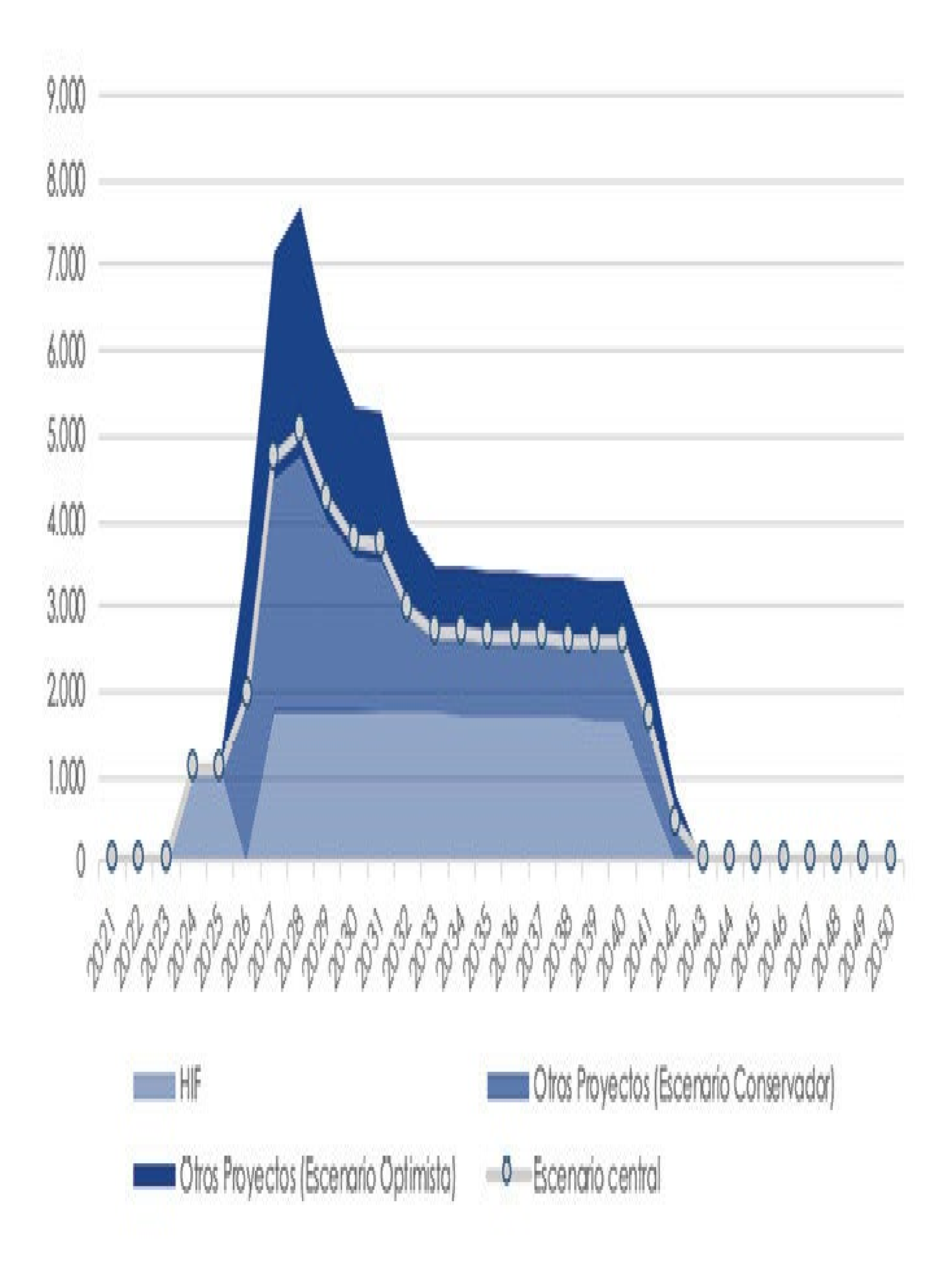
Adicionalmente, la construcción e instalación de la industria del HV en Magallanes requerirá de profesionales que trabajen en labores como la planificación del proyecto, la instalación y el montaje de las plantas, entre otros. Estimamos que durante la construcción del proyecto HIF se requerirá en promedio de 1.500 trabajadores durante el período 2024-2041, con un máximo de 1.800 en el año 2027. A modo de referencia, durante la Fase I HIF tiene contemplada la contratación de 300 ingenieros por dos años, cifra que será aún mayor en la Fase II. Así, estimamos que se requerirá un crecimiento de la oferta de viviendas de Magallanes para poder recibir a esta nueva fuerza laboral. En el escenario conservador, la industria del HV requerirá en promedio de 3.000 trabajadores durante el periodo 2024-2041, con un máximo de 5.000 trabajadores en el año 2028 (ver Figura 19). En el escenario optimista, estimamos que la industria del HV en Magallanes demandará en promedio 4.200 trabajadores hasta el 2041, con un máximo de 8.000 trabajadores el año 2028. En nuestro escenario central en tanto estimamos que se requerirá en promedio 3.000 trabajadores durante el periodo 2024-2041, con un máximo de 5.000 trabajadores el año 2028, cifras que representarán el 3,3% y 5,4% de la fuerza de trabajo actual de Magallanes, respectivamente.

En resumen, la industria del HV requeriría en promedio de 3.000 trabajadores temporales entre los años 2024 y 2041 en el escenario HIF, 6.500 trabajadores entre los años 2026 y 2041 en el escenario conservador y 9.000 trabajadores en el periodo 2024-2050 en el escenario optimista, con un máximo cercano a 15.000 puestos de trabajo en el escenario optimista. En nuestro escenario central, en tanto, estimamos que la industria del HV requerirá en promedio cerca de 7.000 trabajadores durante el periodo 2024-2041, con un máximo de 11.000 el año 2028.

Figura 19: Otros empleos temporales generados de manera directa por la

industria del HV

Puestos de trabajo



9.000
8.000
7.000
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

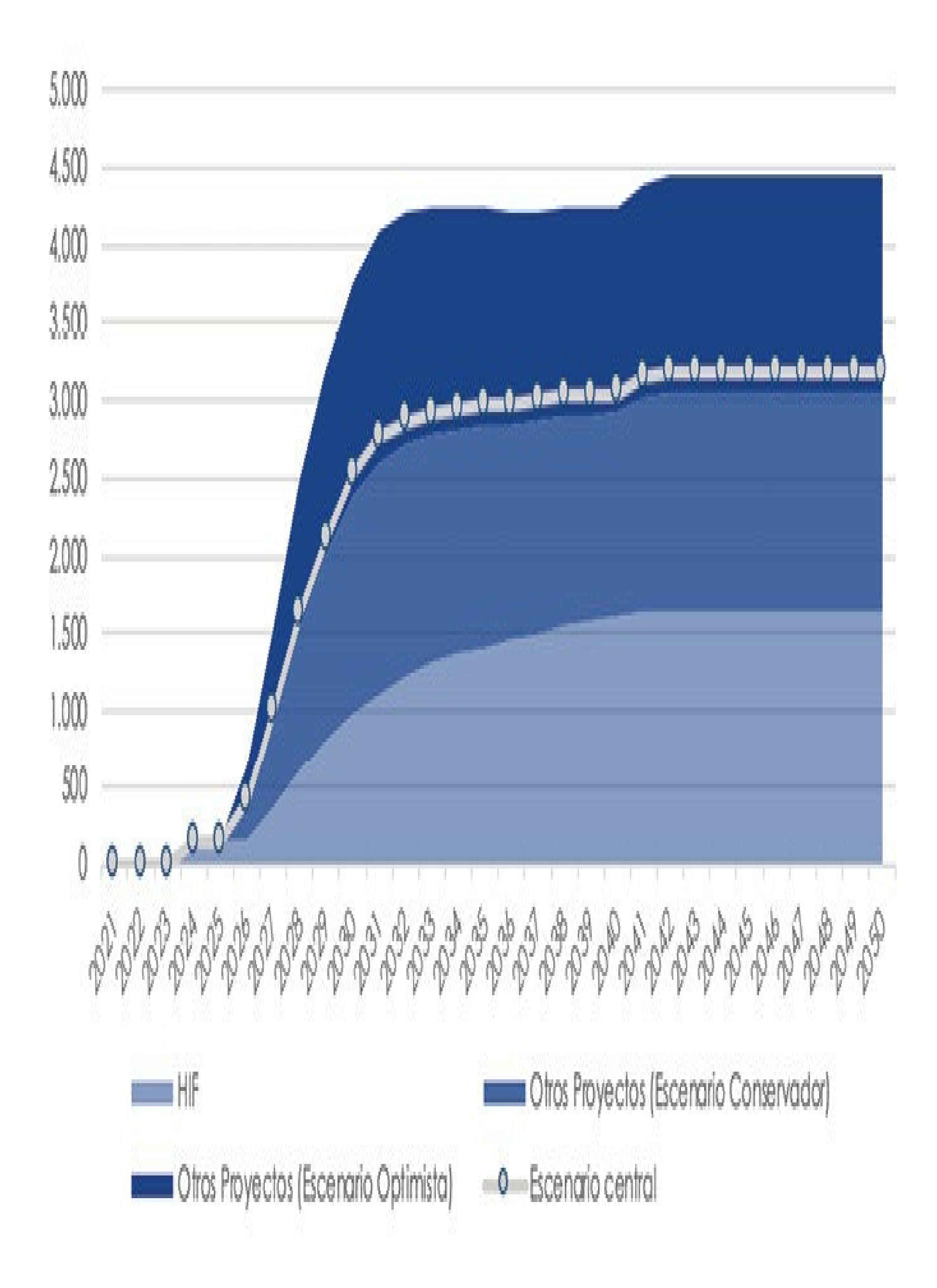
Empleo permanente

El desarrollo de la industria del HV en Magallanes generará, además de los puestos de trabajo temporales asociados a la construcción y a la implementación de los planteles productivos, empleos de carácter permanente, asociados a la operación y mantención (O&M) de aerogeneradores, electrolizadores y plantas productivas, entre otros. Dada la naturaleza de estas labores, la estimación de empleo permanente guarda directa relación con necesidades de capital humano con formación técnica y/o profesional que requerirá la industria del HV en Magallanes. La estimación de empleos directos para la industria del HV es creciente en la medida que ingresa mayor capacidad instalada a la región, y decreciente en el tiempo, pues se asumen cambios tecnológicos asociados a mayor automatización en las funciones (ver Figura 20).

En el escenario HIF, estimamos que se generarán 1.000 empleos de O&M al 2030, los que convergerán gradualmente hasta 1.700 puestos de trabajo al 2050. En el escenario conservador, en tanto, la industria del HV llegará a generar 2.400 puestos de trabajo al 2031, convergiendo a 3.000 empleos al 2050. En el escenario optimista, la industria del HV en Magallanes llegará a requerir más de 4.000 trabajadores al 2040. Finalmente, en nuestro escenario central, estimamos que la industria del HV requerirá de 3.000 trabajadores permanentes para realizar labores de O&M desde 2030 en adelante.

Figura 20: Empleos permanentes generados de manera directa por la industria del HV

Puestos de trabajo

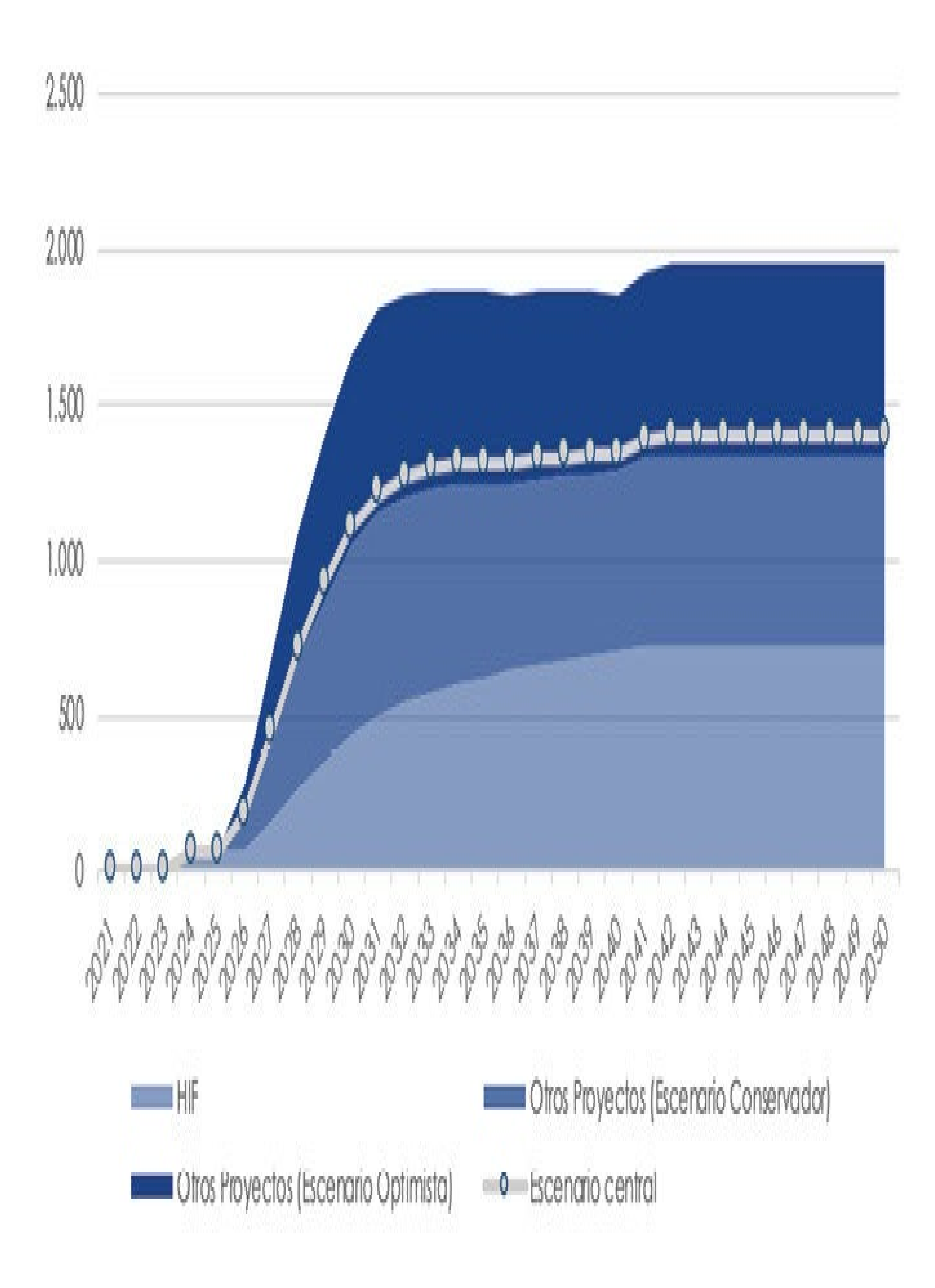

5,000
4,500
4,000
3,500
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
500
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se modelan los empleos indirectos asociados a los encadenamientos productivos derivados de la instalación de la industria del HV en Magallanes, presentados en la Figura 21. Estimamos que en el escenario HIF, se llegarán a generar más de 700 empleos al 2031. En el escenario conservador, se crearán cerca de 1.200 empleos al año 2031. En el escenario optimista, en tanto, se generarán 1.900 empleos indirectos al 2031. Finalmente, en nuestro escenario central modelado se crearán 1.200 puestos de trabajo al 2031, los que convergerán a 1.400 al 2050.

Figura 21: Empleos permanentes generados de manera indirecta por la industria del HV

Puestos de trabajo


2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Impactos medioambientales

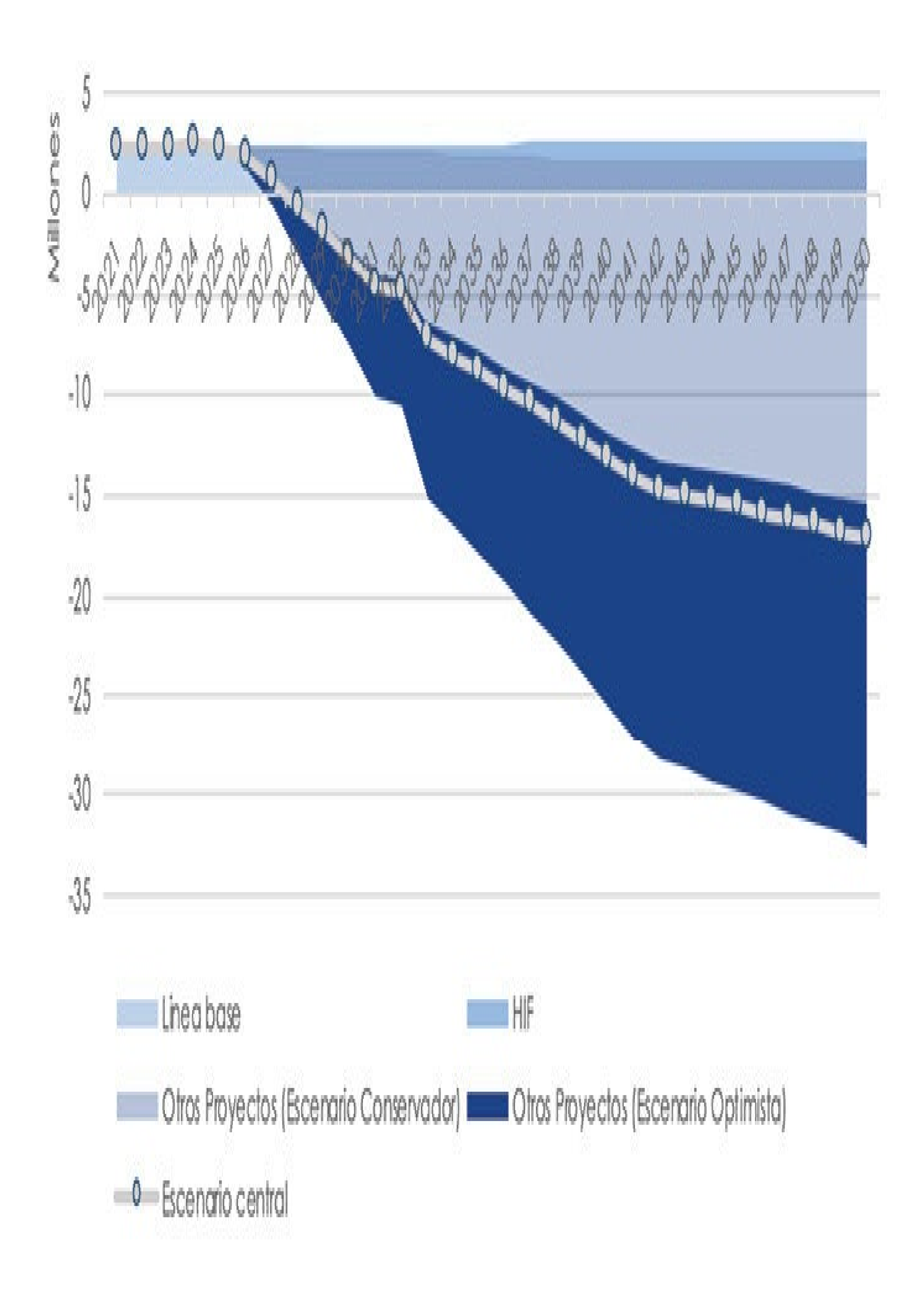
Ahorro en emisiones de CO2[68]

Para el modelamiento del escenario base proyectamos que los niveles de emisiones brutas atribuibles a Magallanes pasarán de 2,3 a 2,6 millones de toneladas anuales entre 2021 y 2050, estimación que asume que las emisiones per cápita de la región, de 13 toneladas/año, se mantendrán constantes durante el período, por lo que la variación interanual obedecerá al crecimiento poblacional de Magallanes. En los escenarios en los que se desarrolla la industria del HV en Magallanes, las emisiones directas de la región debieran mantenerse en gran medida invariables respecto del escenario base, porque los derivados como la e-gasolina y el e-GLP son carbono neutrales, es decir, al momento de su combustión liberan el carbono que fue previamente capturado para su manufactura. Si asumimos que la producción de combustibles carbono neutrales desplaza a la producción de combustibles fósiles convencionales en el mundo, entonces el desarrollo de la industria del HV contribuirá a reducir las emisiones mundiales, porque no se liberarán GEI adicionales aguas arriba. Es por ello que asumimos que la producción de cada unidad de e-gasolina y de e-GLP genera un ahorro del 100% de las emisiones de CO2 liberadas durante el proceso de combustión a las que se suman las fugas durante el proceso de extracción que ascienden a un 16%.[69] En el caso del amoniaco verde, el ahorro en las emisiones proviene de desplazar al amoniaco gris y a sus emisiones asociadas.[70] Así, en el escenario HIF, el ahorro anual en emisiones asociadas a la producción de e-gasolina llegará a 7 millones de toneladas de CO2 al 2050, cifra que equivale a siete veces las emisiones brutas de Magallanes (ver Figura 22). En el escenario conservador, en el que se producen adicionalmente 5,3 millones de toneladas de amoniaco verde, se ahorrarán 24 millones de toneladas de CO2 al 2050, equivalente a nueve veces las emisiones brutas totales de Magallanes. En el caso

optimista, el ahorro superará 41 millones de toneladas de CO_2 al 2050, lo que equivale a más de 16 veces las emisiones liberadas por la región. En nuestro escenario central, en tanto, proyectamos un ahorro de emisiones de 23 millones de toneladas al 2050, cifra que, a modo de contexto, representará el 20% de las emisiones brutas nacionales.[71]

Figura 22: Ahorro de emisiones de GEI atribuibles a industria del HV en Magallanes (reemplazar por versión anterior del gráfico)

Millones de toneladas de CO_2 equivalente



Millones
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

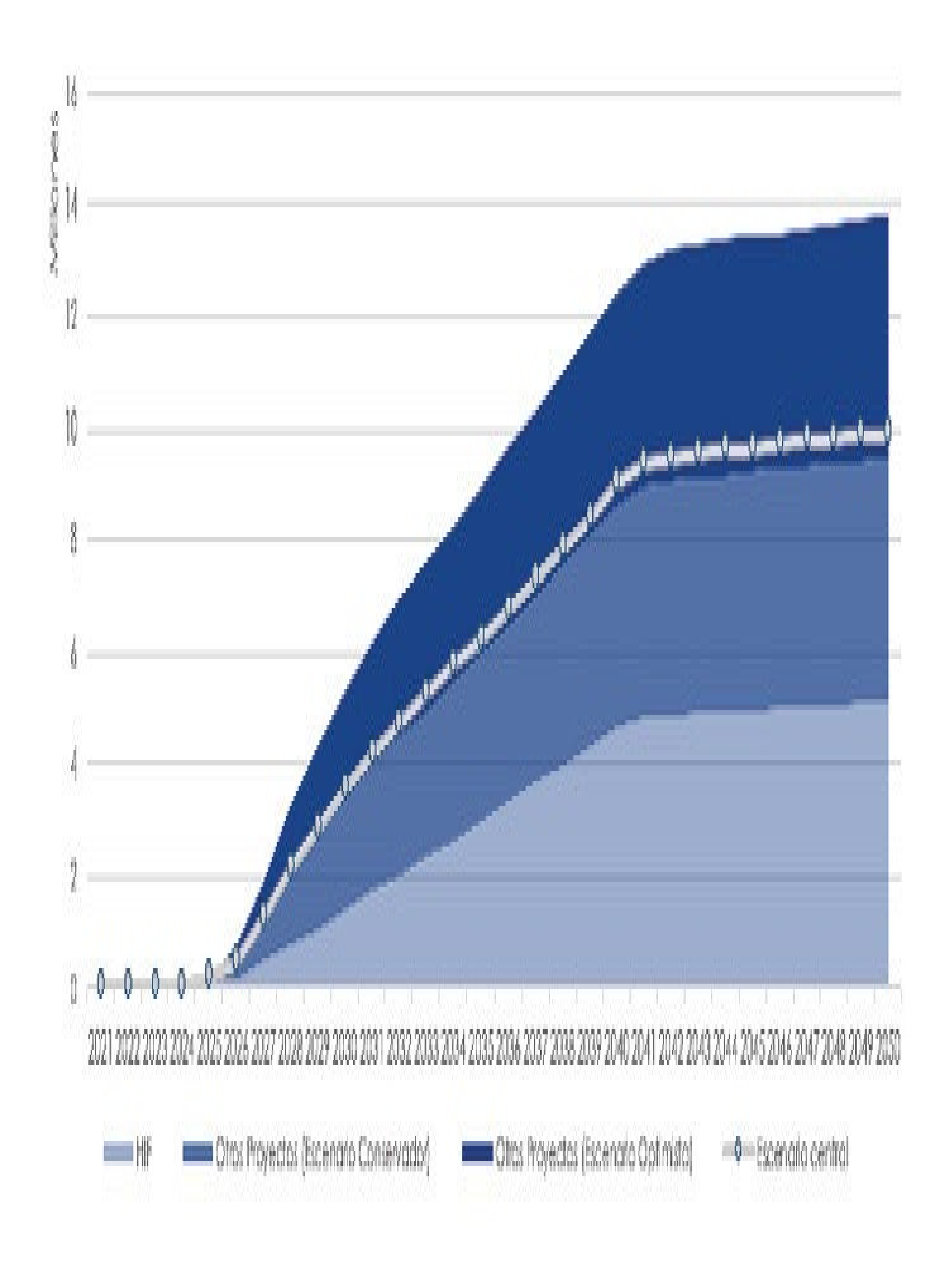
Fuente: Elaboración propia.

Descarga de salmuera

La producción de HV requiere de agua, el cual estimamos será obtenido mediante desalación de agua de mar para todos los proyectos de gran escala. Se estima que por cada kilo de HV se requiere de 9 litros de agua desalada y que por cada litro de agua desalada se obtiene 0,6 litros de salmuera.[72] En el escenario HIF, estimamos que se requerirá desalar 8 millones de m^3 de agua al año, por lo que se producirán anualmente hasta 5 millones de m^3 de salmuera (ver Figura 23). En el escenario conservador, los requerimientos de desalación se incrementarán hasta 14,7 millones de m^3, lo que producirá 9,4 millones de m^3 de salmuera, mientras que en el escenario optimista se requerirá desalar 21,5 millones de m^3, produciendo 14 millones de m^3 de salmuera al año. En nuestro escenario central, proyectamos que se desalarán anualmente 15,4 millones de m^3 y que se producirán 9,9 millones de m^3 de salmuera. Es importante mencionar que HIF se encuentra realizando estudios para optimizar la tecnología de desalación e identificar usos productivos adicionales que se le pueda dar a la salmuera generada para evitar su descarga, lo que reduciría el impacto ambiental del proyecto.

Figura 23: Salmuera producida atribuible a la industria del HV en Magallanes

Millones de toneladas


16
14
12
10
8
6
4
2
0
2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035 2036 2037 2038 2039 2040 2041 2042 2043 2044 2045 2046 2047 2048 2049 2050
HIF
Otros Proyectos (Escenario Conservador)
Otros Proyectos (Escenario Optimista)
Escenario central

Fuente: Elaboración propia.

Impactos medioambientales durante la construcción

En esta etapa los impactos ambientales mayores se encuentran asociados a la emisión de polvo y ruido durante la ejecución de las obras civiles, afectación de la flora y fauna durante el proceso de instalación de aerogeneradores y el impacto vial asociado al movimiento de insumos y mano de obra. Todos estos costos son relativamente bajos y manejables con una buena planificación en la ejecución de la obra, que minimice la afectación de los lugares intervenidos. En el caso particular de la región de Magallanes ello se aprecia en las condiciones estructurales que permiten minimizar estos impactos, principalmente por la baja densidad de población y la existencia de espacios amplios que permiten la elección de locaciones de baja afectación y con acceso vial. Dicho lo anterior, y en concordancia con la Guía para Evaluación Ambiental para Proyectos Eólicos[73], estimamos que los impactos asociados al proceso de construcción serán bajos.

Impactos de la operación de aerogeneradores en la vida silvestre

En este caso, los impactos principales están asociados a ruido, reflejos y riesgo para las aves. Los dos primeros han sido ampliamente reducidos por evoluciones tecnológicas que se han incorporado a los aerogeneradores en los últimos años. Por otra parte, sobre el riesgo para las aves, los últimos estudios indican que estos riesgos, difíciles de cuantificar, podrían ser mitigados por ejemplo mediante la correcta ubicación de los aerogeneradores, a modo tal de interferir lo menos posible con las rutas migratorias de aves.[74] Adicionalmente, desarrollos tecnológicos asociados a mecanismos ultrasónicos, iluminación con luces ultravioletas, pinturas especiales para las turbinas y tecnologías que puedan

detectar movimientos de aves y detener temporalmente el funcionamiento de los aerogeneradores pueden reducir de manera significativa el impacto que pueda tener la generación eólica en la vida silvestre.[75] Dicho lo anterior, es menester mencionar que es de conocimiento de los autores que HIF ha tomado las mayores precauciones posibles para que el impacto de la operación de sus aerogeneradores sea el menor posible.[76] En efecto, desde 2019 HIF ha estado realizando estudios de avifauna con más de 15 especialistas, incluyendo expertos reconocidos regionalmente e internacionalmente en avifauna presente en Magallanes, para determinar la presencia y distribución de aves, identificar áreas de valor, potenciales corredores de vuelo, entre otros antecedentes. Esta información ha sido levantada en forma temprana durante las diferentes estaciones del año, la cual ha sido utilizada para determinar el emplazamiento óptimo de los aerogeneradores de modo tal que se afecte lo menos posible los corredores de vuelo y el desplazamiento de las aves.

4.4.5 Atracción y formación de capital humano e I+D

Técnicos, profesionales y científicos

El desarrollo de la industria del HV en Magallanes conllevará la generación de puestos de trabajo de alta calificación, principalmente de técnicos y profesionales vinculados a la operación y mantención de aerogeneradores y de las plantas productivas del HV y sus derivados. Estimamos que se crearán hasta 3 mil empleos de carácter permanente asociados a esta industria, a los que se deben sumar los empleos temporales generados durante la etapa de diseño, construcción e implementación de los proyectos en la región, los que podrían llegar a aproximadamente 7.000 puestos de trabajo en su punto máximo (Figura 19). Adicionalmente, dado el rol protagónico que tomará Magallanes en el desarrollo de la industria del HV a nivel mundial, estimamos que la región será un polo científico que atraerá a investigadores, los que podrían colaborar con las empresas y los centros educacionales y de investigación de la región.

Formación universitaria y CFT

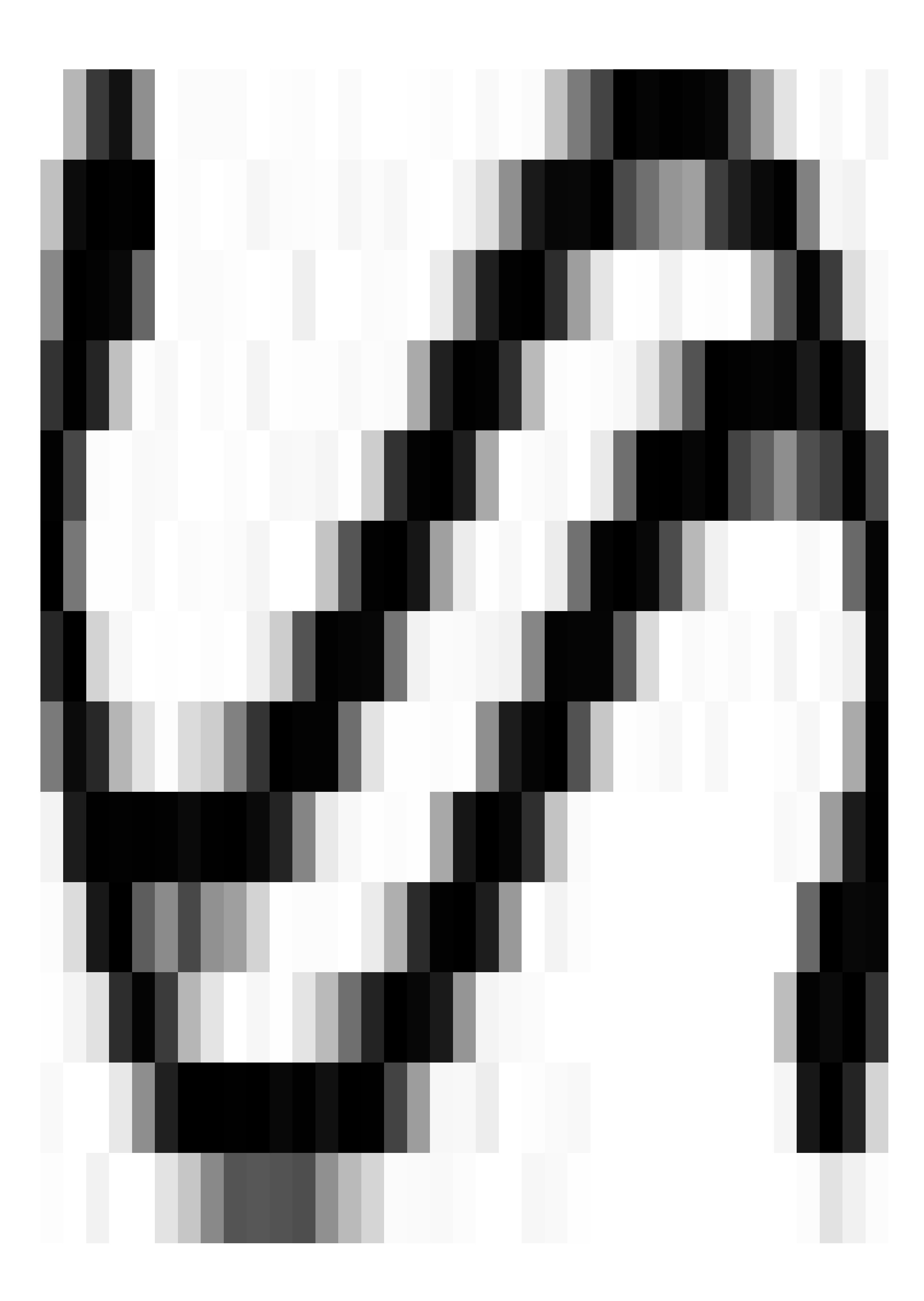
El desarrollo de la industria del HV requerirá de la formación de nuevos profesionales, tanto en Magallanes como en el resto del mundo, que actualmente no existen. Por ello las universidades y los centros de formación técnica (CFT) deberán adaptar sus mallas curriculares para satisfacer los requerimientos de esta nueva industria. Es en ese contexto que el acuerdo que mantiene HIF con la Universidad de Magallanes y con su CFT asociado cobra vital importancia, porque los centros educacionales de la región se han comprometido a adaptar sus programas educativos y/o a crear nuevas carreras, especialidades o maestrías para poder formar a los técnicos y profesionales que HIF y las otras empresas que se instalarán en la región demandarán. En el marco del acuerdo establecido entre HIF y la Universidad de Magallanes destaca el financiamiento para un laboratorio de combustibles, que permitirá a la universidad realizar pruebas durante la fase piloto del proyecto. Cabe destacar que la Universidad de Magallanes tiene una larga historia vinculada al desarrollo productivo de la región, habiendo creado en su momento la carrera de Ingeniería Petroquímica, en la que se formó a los profesionales que se desempeñaron por muchos años en la industria regional de hidrocarburos.

Capacidad de I+D

Los grandes volúmenes de inversión asociados al desarrollo de una industria revolucionaria a nivel mundial, con un impacto medioambiental muy positivo, podría generar un círculo virtuoso de Investigación y Desarrollo (I+D) en torno al HV y a las ERNC en Magallanes. Por ejemplo, consta a los autores de este libro el interés de varios actores por aprovechar el potencial eólico de Magallanes y sus bajas temperaturas para instalar data centers, los cuales requieren de un elevado consumo de energía eléctrica, el que podría ser abastecido de manera limpia en Magallanes.

Estos y otros desarrollos tecnológicos necesariamente atraerán a profesionales y científicos a la región, lo que esperamos se pueda traducir en un cluster, creado por condiciones del desarrollo de mercado del HV, que fomente la inversión y el desarrollo en la región en torno a esta industria.

5. Conclusiones



El cambio climático es una de las principales amenazas que enfrenta la humanidad. Las emisiones de GEI han incrementado la temperatura media de la tierra en aproximadamente 1,1 °C en los últimos 150 años y se estima que esta cifra aumentará a los 1,5 °C en los próximos 20 años. A menos que las emisiones de GEI se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento a cerca de 1,5 °C o incluso a 2 °C será un objetivo inalcanzable. En este caso, las consecuencias para el ser humano y la vida en sociedad serán catastróficas. La ocurrencia de fenómenos climáticos extremos asociados al calentamiento del planeta, como sequías prolongadas, olas de calor e inundaciones, podrían tornar inhabitables ciertas áreas.

El desafío planteado es enorme. Es imperioso reducir las emisiones de GEI en todo el mundo y, al mismo tiempo, continuar por una senda de crecimiento económico que permita mantener o incrementar los niveles de vida de la población del mundo. Caminar por esta angosta senda exige hacer uso de todo el ingenio humano para el reemplazo de los energéticos fósiles que se han utilizado masivamente desde la Revolución Industrial.

Desde el punto de vista tecnológico, la solución del problema requiere, entre otras cosas, reemplazar las energías fósiles por otras que no emitan GEI, en particular, las ERNC. En este punto los avances de los últimos años han sido significativos y, en la actualidad, cerca de un 11% de la energía eléctrica generada en el mundo proviene de ERNC en circunstancias que hace sólo 10 años no superaba el 2%. Hoy, las ERNC son la principal fuente de incremento de la capacidad instalada en generación eléctrica y constituyen, al mismo tiempo, la alternativa de menor costo de generación disponible para la mayoría de los sistemas eléctricos en el mundo.

Sin embargo, el carácter intermitente de las principales fuentes de ERNC y el hecho de que muchos de los usos energéticos sean móviles y/o lejanos a las redes de distribución eléctrica exigen nuevas soluciones que permitan almacenar y transportar la energía que se produce a partir de renovables. En la actualidad existe un conjunto amplio de tecnologías que se encuentran en plena etapa de desarrollo o implementación temprana. La tecnología más avanzada son las baterías químicas, que ya se muestran como alternativas rentables en aplicaciones como el transporte de pasajeros y las flotas de vehículos comerciales de carga liviana y se espera que en el transcurso de esta década alcancen costos inferiores a las alternativas fósiles tradicionales.

Subsiste, sin embargo, un grupo muy amplio de usos para los cuales la batería química no se presenta como una opción factible. Se trata, en términos generales, de aplicaciones lejanas a las redes de distribución eléctrica que requieren una alta densidad energética que la batería química no es capaz de proveer. Entre estas aplicaciones podemos mencionar al transporte marítimo, el transporte aéreo, los camiones de muy alto tonelaje y la maquinaria pesada, entre otras. Se agrega a lo anterior la necesidad de seguir suministrando energía al parque de vehículos tradicionales que, con posterioridad a la irrupción definitiva del automóvil eléctrico con batería química, seguirá circulando por al menos 10 o 15 años. Es en este ámbito donde se espera que el HV y sus derivados jueguen un rol relevante para alcanzar el objetivo de la carbono neutralidad.

El HV se produce utilizando ERNC a partir de un proceso de electrólisis en que el agua se separa en sus dos componentes básicos, el hidrógeno y el oxígeno, sin emitir GEI durante su producción. Aunque el HV puede ser utilizado de manera directa, las dificultades que plantea su almacenamiento y transporte favorecen la elaboración de derivados como el amoniaco verde o los combustibles sintéticos. Para la primera forma de uso indirecto del HV, se combina este con nitrógeno obtenido del medio ambiente para producir amoniaco verde, que constituye una alternativa sustentable al amoniaco convencional, que se obtiene principalmente del gas natural.

La otra forma de hacer uso indirecto del HV es a través de la producción de metanol y combustibles sintéticos. Aquí el HV es combinado con CO2 capturado directamente de la atmósfera, de fuentes industriales o de biomasa, para la síntesis de metanol, el cual puede ser posteriormente transformado en combustibles sintéticos o e-combustibles. El resultado es un amplio abanico de hidrocarburos sintéticos neutros desde el punto de vista de GEI (i.e, las emisiones liberadas en el proceso de combustión son equivalentes a las capturadas durante la elaboración), entre los que se cuentan la e-gasolina, el e-GLP y el e-kerosene. La ventaja de estos combustibles sintéticos es que permiten hacer pleno uso de la tecnología y la infraestructura que actualmente utilizan los combustibles fósiles a lo largo de toda la cadena de valor, desde el transporte (barcos, camiones y oleoductos) hasta su uso final.

En ambos usos indirectos del HV, la tecnología permite hacer uso de las ERNC en una red de infraestructura mundial utilizada para la distribución de combustibles fósiles con todas las ventajas que ello permite, las que incluyen, por cierto, el uso de la logística de almacenamiento y distribución.

La carrera por el desarrollo de la industria del HV está recién comenzando, siendo Chile y Australia los países con los proyectos con mejores perspectivas de costo. A la fecha se han anunciado 60 proyectos de HV en Chile, de los cuales cinco se ubicarán en Magallanes. Estos se favorecerán de los vientos patagónicos, que permiten alcanzar factores de planta superiores al 55%, rendimientos que no se encuentran en otros lugares del mundo. Se agregarán también desarrollos en el norte de Chile que se centran en la radiación solar, que también se ubica entre las mejores del mundo. En el caso de Australia, el desarrollo será principalmente en torno a la energía solar.

La primera instalación comercial que hará uso del HV en Chile será el proyecto piloto “Haru Oni” de HIF. Este proyecto se emplaza en las afueras de la ciudad de Punta Arenas y permitirá producir gasolina y GLP a partir del viento, el agua y de residuos forestales. El proyecto significó una inversión de US$51 millones que anticipa una inversión adicional de US$14.500 millones que la empresa HIF

materializará en los próximos años. Se añaden a esta inversión otros proyectos de empresas como HNH Energy, H1 Magallanes, Selknam y Total Energy, los que se encuentran en distintas etapas de desarrollo. La materialización de estos proyectos cambiará completamente la realidad de la Región de Magallanes, implicando un gran desarrollo socioeconómico para sus habitantes y una muy significativa contribución a la reducción de la emisión de GEI de Chile.

En este libro se cuantifica el impacto económico, laboral y ambiental que tendrá la revolución del HV en la Región de Magallanes. Se consideran tres escenarios para proyectar los efectos del desarrollo de la industria del HV. El primer escenario plantea solo el desarrollo del proyecto de HIF en todas sus fases; un segundo escenario conservador contempla la instalación de toda la industria del HV, que incluye el desarrollo completo del proyecto de HIF y un 50% del desarrollo de los cuatro proyectos adicionales (mencionados arriba); mientras que un tercer escenario optimista proyecta el desarrollo completo del proyecto de HIF y un 100% del desarrollo de los cuatro proyectos adicionales. En lo que sigue se presentan los resultados de las proyecciones cuantitativas para un escenario central, que refleja probabilísticamente una combinación de los tres escenarios anteriores, ponderados en un 20%, un 50% y un 30%, respectivamente.

En este escenario central, el desarrollo de la industria del HV implica una inversión total de la industria por US$29.000 millones hasta el año 2050, monto equivalente a 14 veces el PIB anual actual de Magallanes. Esta inversión incluye la instalación de 5.000 aerogeneradores, con una capacidad de generación eléctrica eólica de 15 GW.

Al año 2050, la producción anual de HV llegará a 1,7 millones de toneladas, de las cuales se derivarán 2,4 millones de m^3 anuales de e-gasolina y 166.000 toneladas anuales de e-GLP (todo lo anterior producido por HIF), y 5,9 millones de toneladas de amoniaco verde (producido por los otros cuatro proyectos).

Estas inversiones y producciones de HV y derivados tendrán un gran impacto sobre la economía regional. Al 2050, las exportaciones del HV alcanzarán los US$5.000 millones, que multiplican por 8 las exportaciones de otros productos de Magallanes proyectadas al mismo año. Además, el proyecto de HIF colocará en el mercado nacional un volumen de e-GLP valorado en US$90 millones.

Se proyecta que el PIB de Magallanes, que sin la industria del HV aumentaría a US$3.555 millones al año 2050, casi se duplicará con el desarrollo de la industria del HV, llegando a un nivel de US$6.900 al 2050. Esta proyección, basada en la matriz insumo-producto para Magallanes, incluye el desarrollo del HV y de otros sectores productivamente encadenados con el HV. El desarrollo del HV demandará miles de empleos adicionales, tanto temporales como permanentes. En la construcción de los proyectos se empleará en promedio anual entre los años 2024 y 2041, 3.600 trabajadores y 3.000 profesionales. Al año 2050, el empleo permanente directo (en la industria del HV) será de 3.000 personas y el empleo permanente indirecto (en otros sectores encadenados con el HV) alcanzará a otras 1.400 personas.

La industria del HV conllevará un enorme impacto beneficioso en lo ambiental, a escala regional, nacional e incluso global. La producción de HV y sus derivados implica un ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de 24 millones de toneladas al año 2050, lo que equivale al 20% de la emisión bruta actual de dichos gases en todo Chile.

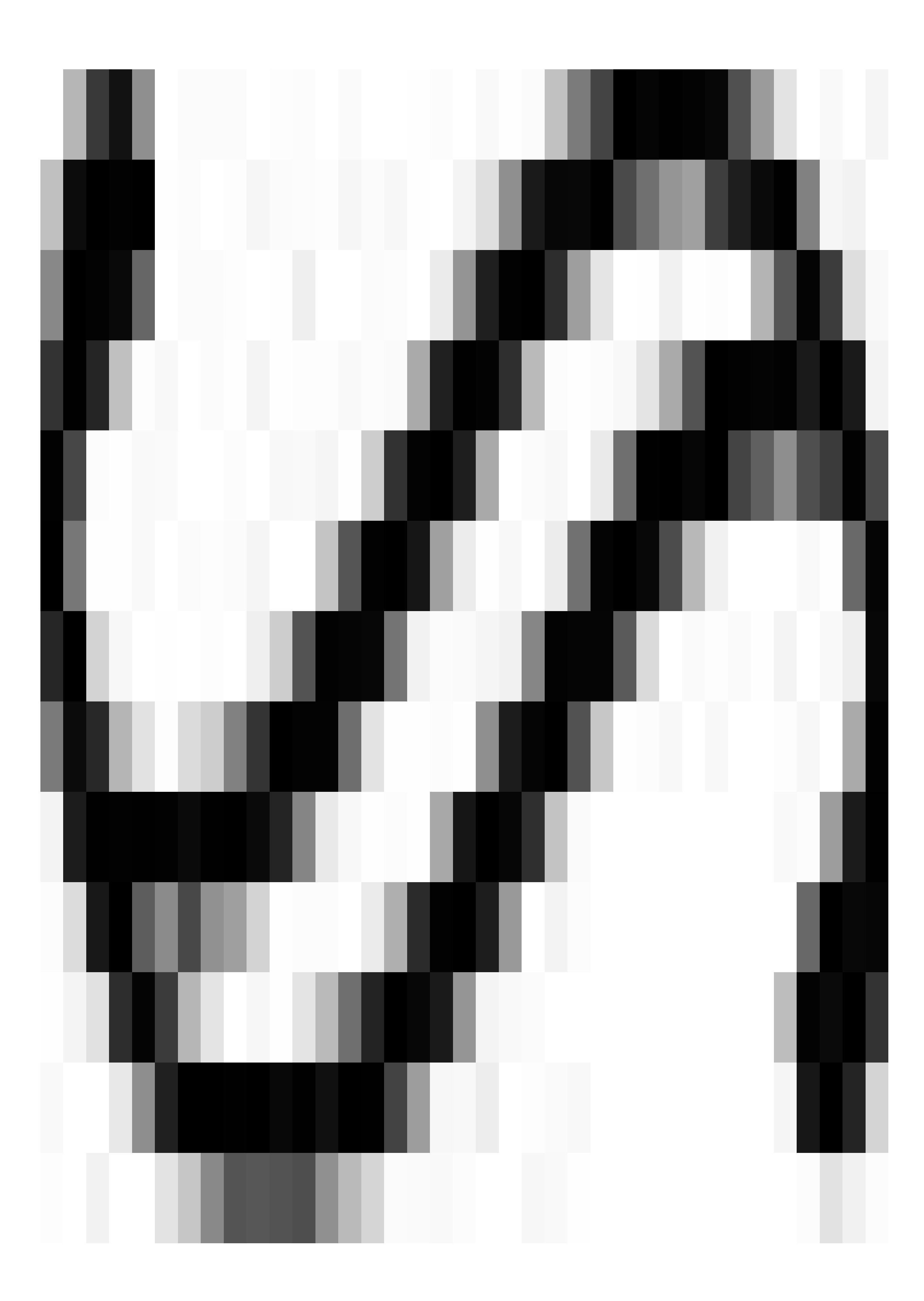
La producción de HV requiere de agua que será obtenida de la desalación de agua de mar. HIF está realizando estudios para optimizar la tecnología de desalación e identificar usos productivos adicionales de la salmuera para evitar su descarga, lo que reduciría el impacto ambiental de los 9,9 millones de m^3 de salmuera que el proyecto podría generar en 2050. Otros impactos ambientales se asocian a la emisión de polvo y ruido durante la ejecución de las obras civiles, la afectación de flora y fauna durante la instalación de aerogeneradores y el impacto vial asociado al movimiento de insumos y trabajadores. Todos estos impactos son relativamente menores, siendo considerados en las aprobaciones de

los correspondientes estudios de impacto ambiental. También existen potenciales impactos de la operación de los aerogeneradores sobre la vida silvestre, asociados a ruido, reflejos y riesgo para las aves. Avances tecnológicos recientes en el diseño y la ubicación de los aerogeneradores permiten mitigar significativamente estos riesgos.

La industria del HV en Magallanes conllevará la generación de empleos de alta calificación, incluyendo los empleos temporarios y permanentes de profesionales que se han mencionado. Considerando además el desarrollo de punta mundial que tendrá el HV en Magallanes, se estima que la región será un polo científico que atraerá a investigadores a las empresas y a los centros de investigación de la región. La industria del HV impulsará la formación de nuevos profesionales en las universidades y los centros de formación técnica de la región. El HV también impulsará la investigación y el desarrollo en la zona, como ya lo demuestra el acuerdo establecido entre HIF y la Universidad de Magallanes para el financiamiento de un laboratorio de combustibles en dicha universidad.

Las proyecciones presentadas en este libro para el desarrollo socioeconómico de la región y su contribución a la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero a nivel global son muy auspiciosas. El desarrollo de esta industria es un ejemplo que demuestra cómo los recursos naturales y la innovación inteligente permiten trazar un futuro en que el desarrollo económico será compatible con el cuidado del medio ambiente. Esperamos que lo que anticipamos en Magallanes se repita en el norte de Chile y en el resto del mundo, y que nos permita avanzar decididamente a la carbono neutralidad con innovación y prosperidad.

Índice de tablas, figuras y recuadros

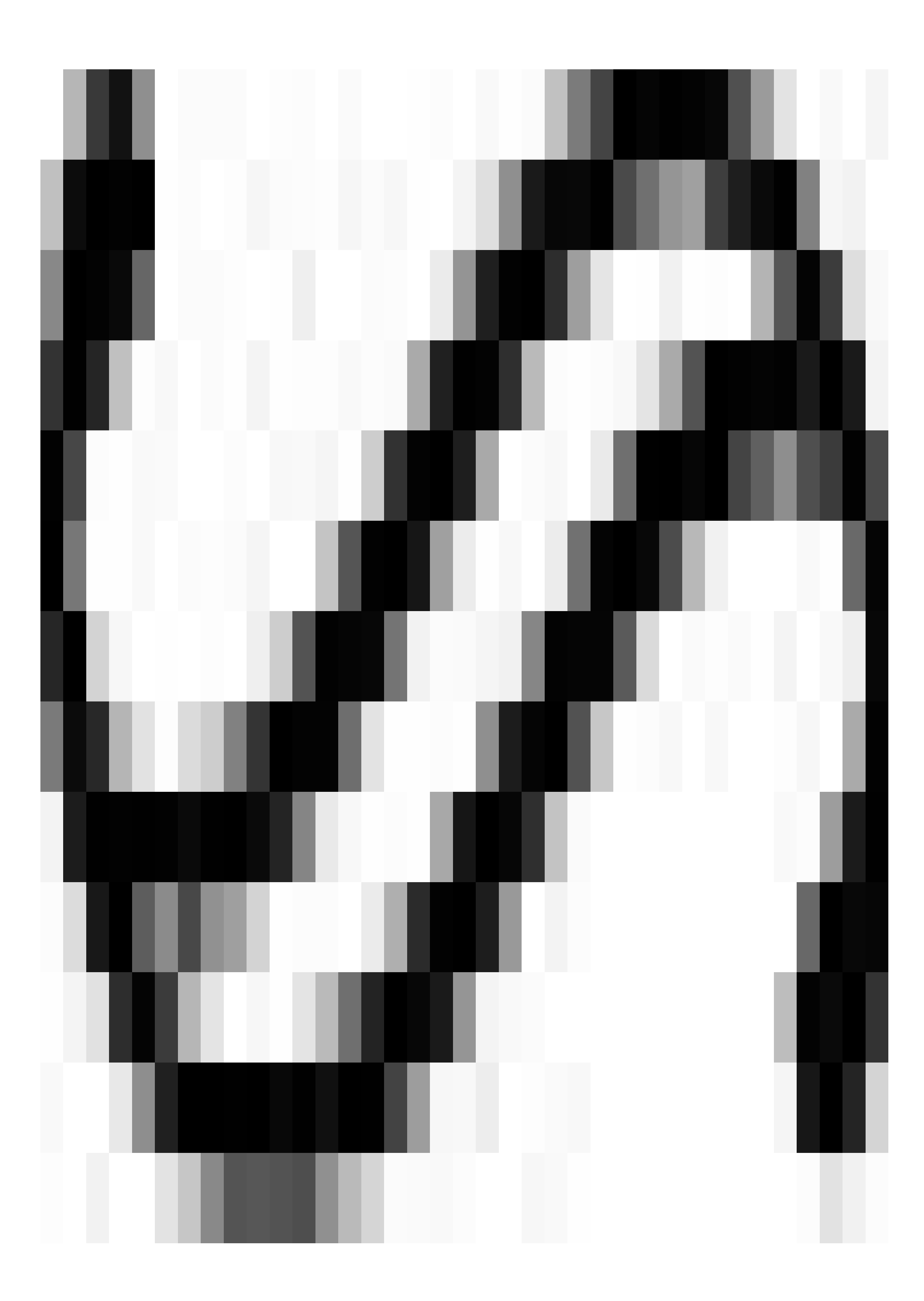


Tablas

Recuadros

Figuras

Anexos



Anexo 1

Costo construido del HV

Las Tablas A1-1 y A1-2 presentan el detalle de los parámetros considerados en el cálculo para estimar el costo actual de la generación ERNC y del HV en Magallanes y el mundo. Para el cálculo del costo nivelado de la electricidad, se asumió una tasa de costo de capital promedio ponderada (WACC) del 6% y una vida útil promedio de 30 años para los activos. Los factores de planta son de 16,1% para la generación solar PV y de 55% para la generación eólica onshore.

Tabla A1-1: Estimación del LCOE actual de las ERNC

Generación eléctrica		Unidad	Valor
Parámetros generales	WACC	%	6%
Vida útil	años	30	
Factor de planta	Solar PV	%	16,1%
Eólica (onshore)	%	55,0%	
CAPEX/OPEX Solar PV	CAPEX	US$/kWh	883
OPEX	US$/kW/año	18	
CAPEX/OPEX Eólica	CAPEX	US$/kWh	1.349
OPEX	US$/kW/año	22,1	
Costo nivelado de la electricidad (LCOE)	Solar PV	US$/kWh	0,058
Eólica (onshore)	US$/kWh	0,025	
Solar PV	US$/MWh	58,2	

Eólica (onshore)	US$/MWh	24,9

Fuente: Elaboración propia.

*Factores de planta, CAPEX y OPEX corresponden al promedio mundial al 2020 de acuerdo a lo reportado en IRENA (2020).

Tabla A1-2: Costo construido del HV

Producción de hidrógeno		Un
Constantes	Hidrógeno	kW
Consumo de agua*	kg H2O/ kg h2	9
Vida útil (Alcalina/PEM/SOEC)	Años	20
Parámetros técnicos Electrolizador	Alcalina	%
PEM	%	67
SOEC	%	74
Parámetros técnicos desmineralización del agua	Eficiencia	%
Consumo eléctrico	kWh/m3	3,5
CAPEX	Alcalina	US
PEM	US$/kW	1.0
SOEC	US$/kW	4.2
OPEX	Alcalina/PEM/SOEC	%
Costo nivelado	Desmineralización del agua	US
Costo nivelado hidrógeno (Solar PV)	Alcalina	US
PEM	US$/kg	6,2
SOEC	US$/kg	14
Costo nivelado hidrógeno (Eólica onshore)	Alcalina	US

PEM	US$/kg	2,2
SOEC	US$/kg	4,5

Anexo 2

Caracterización de la Región de Magallanes

Perfil sociodemográfico

Según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) para el año 2020, la población de la región de Magallanes se estima en 178.790 personas, equivalentes al 0,92% del total nacional (ver Tabla A2-1). El 82% de los habitantes de la región se concentra en la comuna de Punta Arenas, cuya población se estima en 146.900 personas. De la organización territorial y demográfica de la región, destaca que el 92% de la población se ubica en zonas urbanas, cifra superior a lo observado a nivel nacional (89%).

Se estima que la población regional se distribuye en 65.528 hogares, con un promedio de 3,4 habitantes por hogar, en línea con el promedio nacional de 3,7 personas por hogar.

Tabla A2-1: Indicadores sociodemográficos, 2020

Indicador	Magallanes	País
Población	178.790	19.532.48
Porcentaje de población en zona urbana	92%	89%
Porcentaje población masculina	47%	46%

Porcentaje población femenina	53%	54%
Hogares	65.528	6.578.326
Habitantes por hogar	3,37	3,72
Porcentaje hogares con adultos mayores (60 años y más)	39%	39%
Porcentaje hogares con niños (0 a 17 años)	53%	58%

Fuente: Elaboración propia en base a la CASEN 2020.

En cuanto a los niveles de educación, la población de la región de Magallanes tiene en promedio 11,8 años de escolaridad, similar al promedio nacional de 11,7 años (ver Tabla A2-2). Por otro lado, se estima que el 68,5% de la población mayor de 18 años cuenta con 12 o más años de educación, muy parecido a lo observado a nivel nacional. Magallanes destaca por ser una de las regiones del país con menor tasa de analfabetismo: sólo un 2,4% de la población no sabe leer ni escribir, lo que se compara con un 3,6% a nivel nacional[77].

En materia laboral, la encuesta CASEN 2020 dio cuenta de un promedio de 1,32 ocupados por hogar, cifra algo menor al promedio nacional de 1,38. La participación laboral de la región, en tanto, era superior a la nacional, independiente de si esta se mide como participación laboral total (55% versus 53%), como participación laboral femenina (47% versus 45%) o como participación laboral juvenil (56% versus 55%). Además, la tasa de inactividad de Magallanes alcanzaba al 17,8%, mientras que la nacional se estimaba en 18,3%.

En materia de ingresos, de la CASEN 2020 se tiene que el promedio del ingreso autónomo de los hogares en Magallanes es de $1.082.958, 18% superior a los $916.367 que se promedia en el país. Similar es la situación si se compara el ingreso monetario de los hogares (incluye el ingreso autónomo y las transferencias monetarias que se reciben del Estado), constatándose que el promedio de la región de Magallanes es 16% superior a la media nacional. Cabe destacar que los mayores ingresos de la región se dan en conjunto con un nivel similar de desigualdad. El coeficiente de Gini medido a partir de los ingresos autónomos se estimó en 0,528 para la región de Magallanes, similar al 0,530 a nivel país. Para los ingresos monetarios, se obtienen resultados casi idénticos para la región y el país, ambos en torno a 0,51.

Finalmente, en lo que respecta a la pobreza, se observa que en la región de Magallanes esta alcanza un 5,2% mientras que a nivel nacional se estima en 9,5%. Ahora, si esta se mide usando un enfoque multidimensional, la tasa de pobreza de la región de Magallanes es de un 8,1%, un porcentaje menos de la mitad que el 16,8% a nivel nacional[78].

Tabla A2-2: Indicadores socioeconómicos, 2017 y 2020

Dimensión	In
Educación	Es
Porcentaje de población de 18 y más años con 12 o más años de estudio	68
Tasa de analfabetismo*	2,4
Salud	Po
Porcentaje población afiliada a Isapre	17
Tasa de atención médica ante enfermedad o accidente en los últimos 3 meses	96
Trabajo	Pr
Tasa de participación laboral	55
Tasa de participación laboral femenina	46
Tasa de participación laboral juvenil (19 a 29 años)	56
Inactivos y no estudian (19 a 29 años)	17
Ingresos	Co
Coeficiente de Gini (ingreso monetario)	0,5
Promedio del ingreso autónomo mensual del hogar (en $ 2020)	1.0
Promedio del ingreso monetario mensual del hogar (en $ 2020)	1.1
Pobreza	Po

Pobreza multidimensional hogares*	8,1

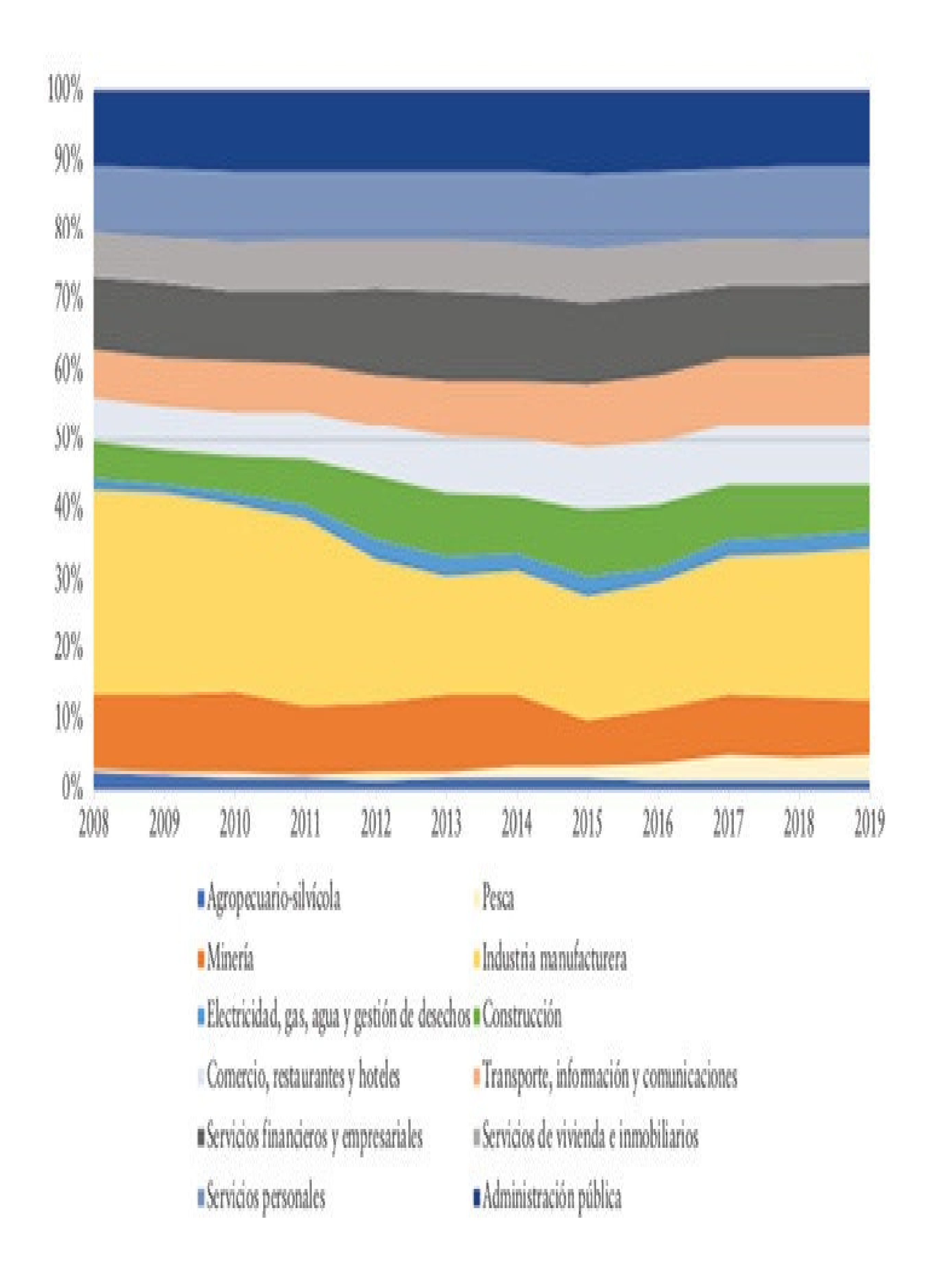
Fuente: Elaboración propia en base a CASEN 2020.

(*) Datos de la CASEN 2017.

Estructura sectorial de la producción y las exportaciones de Magallanes

En el año 2019, el Producto Interno Bruto (PIB) de la región de Magallanes fue de US$3 mil millones, un 1,1% del PIB nacional, cifra que es superior a su participación poblacional. La principal actividad económica de la región es la industria manufacturera, que representa un 22% del PIB regional (ver Figura A2-1). En segundo y tercer lugar de importancia relativa se encuentran los servicios personales y la administración pública, cada uno con un 11% del PIB regional. Cabe señalar que la mayor parte de los sectores económicos muestran participaciones estables en el tiempo.

Figura A2-1: PIB de Magallanes por actividad económica (% participación anual)


100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
Agropecuario-silvícola
Pesca
Minería
Industria manufacturera
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos
Construcción
Comercio, restaurantes y hoteles
Transporte, información y comunicaciones
Servicios financieros y empresariales
Servicios de vivienda e inmobiliarios
Servicios personales
Administración pública

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Banco Central.

En el año 2019, 14.629 empresas de la región de Magallanes declararon ingresos ante el Servicio de Impuestos Internos (SII), totalizando ventas aproximadas por US$2.970 millones y generando alrededor de 75.688 empleos (ver Tabla A2-3). En la economía regional existe una amplia participación de empresas dedicadas al comercio (al por mayor y al por menor) y reparadoras de vehículos automotores y motocicletas, las cuales representaron un 26% del total de las empresas en la zona, generaron un 15,7% del empleo y ventas anuales de US$826 millones. La industria manufacturera tuvo ventas anuales por US$605 millones, empleando al 11% de los trabajadores de la región. El principal producto de la industria manufacturera de la región es el metanol que se produce por Methanex a partir de gas natural, principalmente importado desde Argentina.

Tabla A2-3: Estadísticas de empresas XII región por rubro económico.

Rubro Económico
Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y m
Industria manufacturera
Transporte y almacenamiento
Construcción
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca
Actividades de alojamiento y de servicio de comidas
Actividades de servicios administrativos y de apoyo
Actividades profesionales, científicas y técnicas
Explotación de minas y canteras

Actividades inmobiliarias
Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social
Actividades financieras y de seguros
Enseñanza
Otras actividades de servicios
Información y comunicaciones
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativas
Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obliga
Sin información
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado
Suministro de agua; evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y desco
Actividades de los hogares como empleadores; actividades no diferenciadas de lo
Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales
Total

Fuente: Elaboración propia a partir de información del SII.

La región de Magallanes exportó US$427 millones en 2020, cifra que representa un 0,6% de las exportaciones totales del país (ver Tabla A2-4). El principal producto exportado por la región es el metanol (de Methanex), con exportaciones por US$198 millones, un 46% de las exportaciones totales.

La segunda industria exportadora corresponde a la acuícola, con exportaciones por US$121 millones en 2020, un 28% del total regional. En tercer lugar, se encuentra el petróleo y sus derivados producidos por ENAP (butano y propano), cuyas exportaciones alcanzaron los US$81 millones en 2020, un 19% del total. Finalmente, las exportaciones de "rancho de naves" representaron un 4,1% del total con US$17,6 millones. Estas exportaciones reúnen todos los suministros que se venden a las embarcaciones internacionales (combustible, repuestos, etc.).

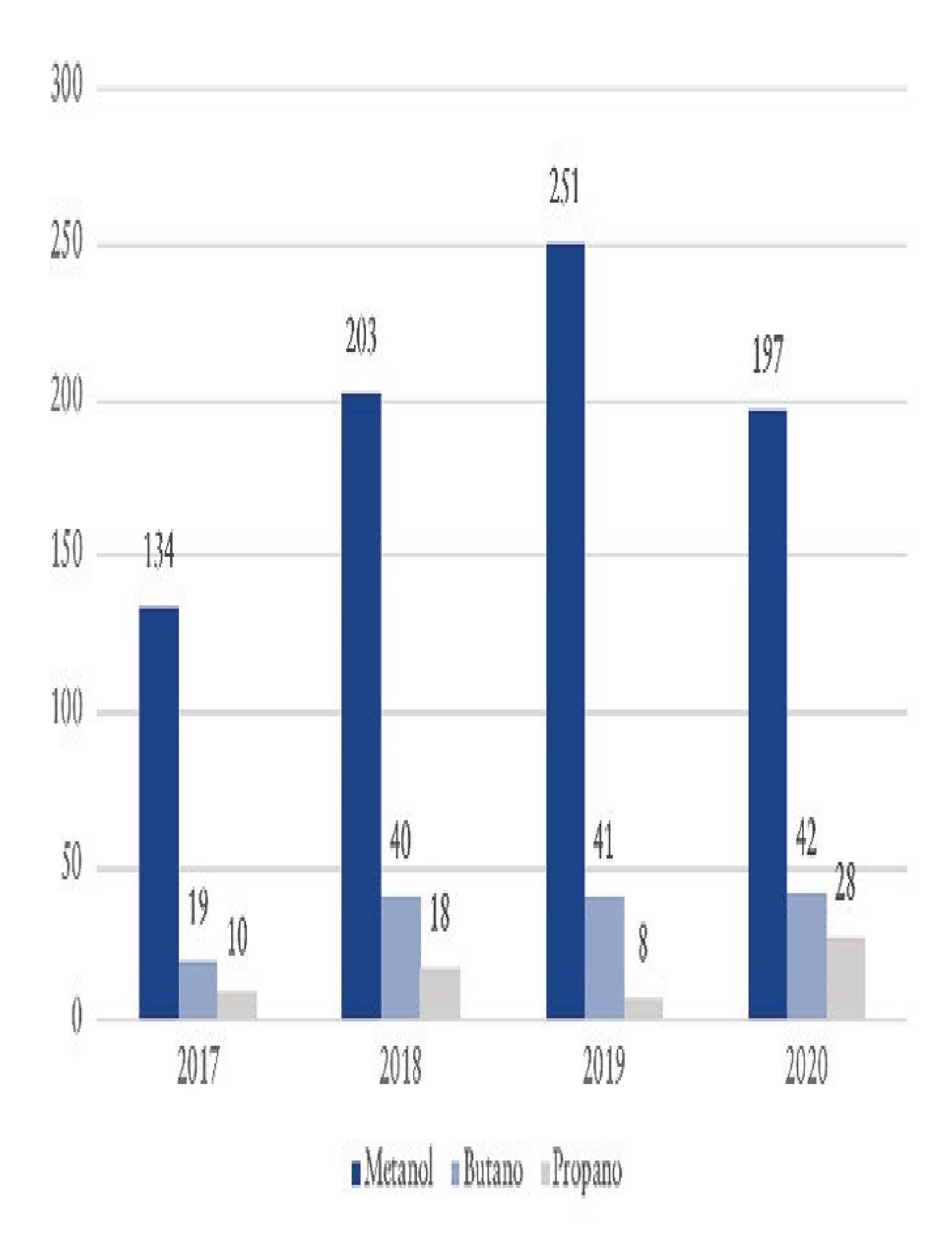
Tabla A2-4: Principales exportaciones de la región en 2020

Producto	Exportaciones (MMUS$)	% del total
Metanol	198,3	46%
Salmones y truchas	121,0	28,3%
Petróleo y derivados (butano y propano)	81,4	19,1%
Rancho de naves	17,6	4,1%
Otros	8,5	2,0%
Total	426,9	100,0%

Fuente: Aduanas.

Las exportaciones de hidrocarburos desde Magallanes han mostrado un crecimiento estable a lo largo de los últimos cuatro años, a excepción del año 2020. El metanol es el producto más exportado de la región; registró crecimientos de un 88% en valor entre los años 2017 y 2019, para luego tener una caída de un 21% en el año 2020 (ver Figura A2-2). Por su parte, el butano también tuvo un crecimiento constante desde el 2017, manteniéndose en un promedio de US$41 millones en los últimos tres años. Finalmente, el propano mostró un alza en sus exportaciones durante el 2020, con un aumento de aproximadamente US$20 millones desde el año 2019.

Figura A2-2: Exportaciones de hidrocarburos entre 2017 y 2020


300
250
200
150
100
50
0
251
203
197
134
40
41
42
19
10
18
8
28
2017
2018
2019
2020
Metanol
Butano
Propano

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Servicio Nacional de Aduanas.

Estructura tributaria de la región de Magallanes

El año tributario 2019, la recaudación tributaria de Chile ascendió a $34,6 billones, cuya estructura se presenta en la Tabla A2-5. El principal impuesto, en términos de su contribución, fue el IVA, por el cual el Estado percibió ingresos de $16,4 billones, equivalentes al 47,3% de la recaudación del año 2019. Por su parte, el Impuesto a la Renta de Personas y Empresas recaudó $14,3 billones, es decir un 41,4% del total. Los ingresos asociados a los Impuestos a Productos Específicos fueron de $2,8 billones, 8,1% de la recaudación total, mientras que otros impuestos fueron responsables del 3,2%.

Tabla A2-5: Estructura tributaria de Chile, 2019 (millones de pesos)

Tipo de Impuesto	Impuestos	%
IVA	16.357.283	47,3%
Impto. a la Renta	14.306.909	41,4%
Impto. A Prod. Específicos	2.802.132	8,1%
Impto. a los Actos Jurídicos	668.211	1,9%
Impto. al Comercio Exterior	331.846	1,0%
Impto. Varios	716.223	2,1%
Fluctuaciones deudores	(453.872)	-1,3%
Cuentas no Tributarias	(149.510)	-0,4%

Total	34.579.222	100%

Fuente: SII y Tesorería General de la República.

La Tabla A2-6 desglosa la recaudación tributaria a nivel regional, en la cual se observa que la contribución de Magallanes ascendió a $156.167 millones, es decir, el 0,45% de la recaudación nacional. En la misma tabla destaca que las principales regiones en términos de contribución a la recaudación nacional fueron la Metropolitana y de Valparaíso, las que dieron cuenta del 75,26% y 13,91% del total.

Tabla A2-6: Recaudación tributaria de Chile, por región 2019 (millones de pesos)

Regiones	Regiones	Recaudación total	Contribución
XV	Arica y Parinacota	106,7	0,31%
I	Tarapacá	100,1	0,29%
II	Antofagasta	373,2	1,08%
III	Atacama	90,5	0,26%
IV	Coquimbo	182,4	0,53%
V	Valparaíso	4.808,3	13,91%
RM	RM	26.026,0	75,26%
VI	O'Higgins	624,1	1,80%
VII	Maule	353,7	1,02%
XVI	Ñuble	152,3	0,44%
VIII	Biobío	802,2	2,32%
IX	Araucanía	382,6	1,11%

XIV	Los Ríos	192,0	0,56%
X	Los Lagos	184,9	0,53%
XI	Aysén	44,0	0,13%
XII	Magallanes	156,2	0,45%
Total		34.579,2	100,00%

Fuente: Tesorería General de la República.

La estructura tributaria de Magallanes se compone en un 69,4% por IVA, un 37,3% por Impuestos a la Renta, un -3% por Impuestos a Productos Específicos y un -3,7% por otros impuestos (ver Tabla A2-7). Cabe destacar que el 16% de la recaudación por pago de Impuesto a la Renta de Magallanes correspondió a Impuesto de Primera Categoría, cifra que se compara con el 29% a nivel nacional.

Tabla A2-7: Estructura tributaria de la Región de Magallanes, 2019

	Millones de pesos	Participación
IVA	108.431	69,4%
Impto. a la Renta	58.274	37,3%
Impto. Varios	6.881	4,4%
Otros Ingresos Tributarios	2.665	1,7%
Impto. al Comercio Exterior	846	0,5%
Impto. a los Actos Jurídicos	738	0,5%
Impto. a Prod. Específicos	- 4.723	-3,0%
Sistema de Pagos de Imptos.	- 16.945	-10,9%
Total	156.167	100,0%

Fuente: Informe Financiero del Tesoro 2019 de la Tesorería General de la República.

Cabe destacar que existen una serie de beneficios tributarios que favorecen el desarrollo de actividades productivas en la región, que explican el bajo aporte de Magallanes a la recaudación tributaria nacional. Los principales beneficios tributarios se resumen en la Tabla A2-8.

Tabla A2-8: Resumen de beneficios tributarios de zonas extremas

Beneficio
I. Fondo de Fomento y Desarrollo de las Regiones Extremas - Art. 38° DL 3529/
II. Bonificación a la Mano de Obra - ley N° 19.853
III. Crédito tributario para las inversiones en zonas extremas - Ley Austral (19.6(
IV. Leyes Navarino y Tierra del Fuego
V. Zona Franca

Fuente: Informe “Efectividad y aplicación práctica de los incentivos tributarios y las leyes de excepción en favor de las zonas extremas de nuestro país” (2019) elaborado por el Ministerio de Hacienda, y el informe “Chile: Evaluación de las Zonas Francas” (2017) preparado por el Banco Mundial.

* Incluye gasto de Aysén y Palena.

** Incluye gasto de las zonas francas de Iquique y Punta Arenas.

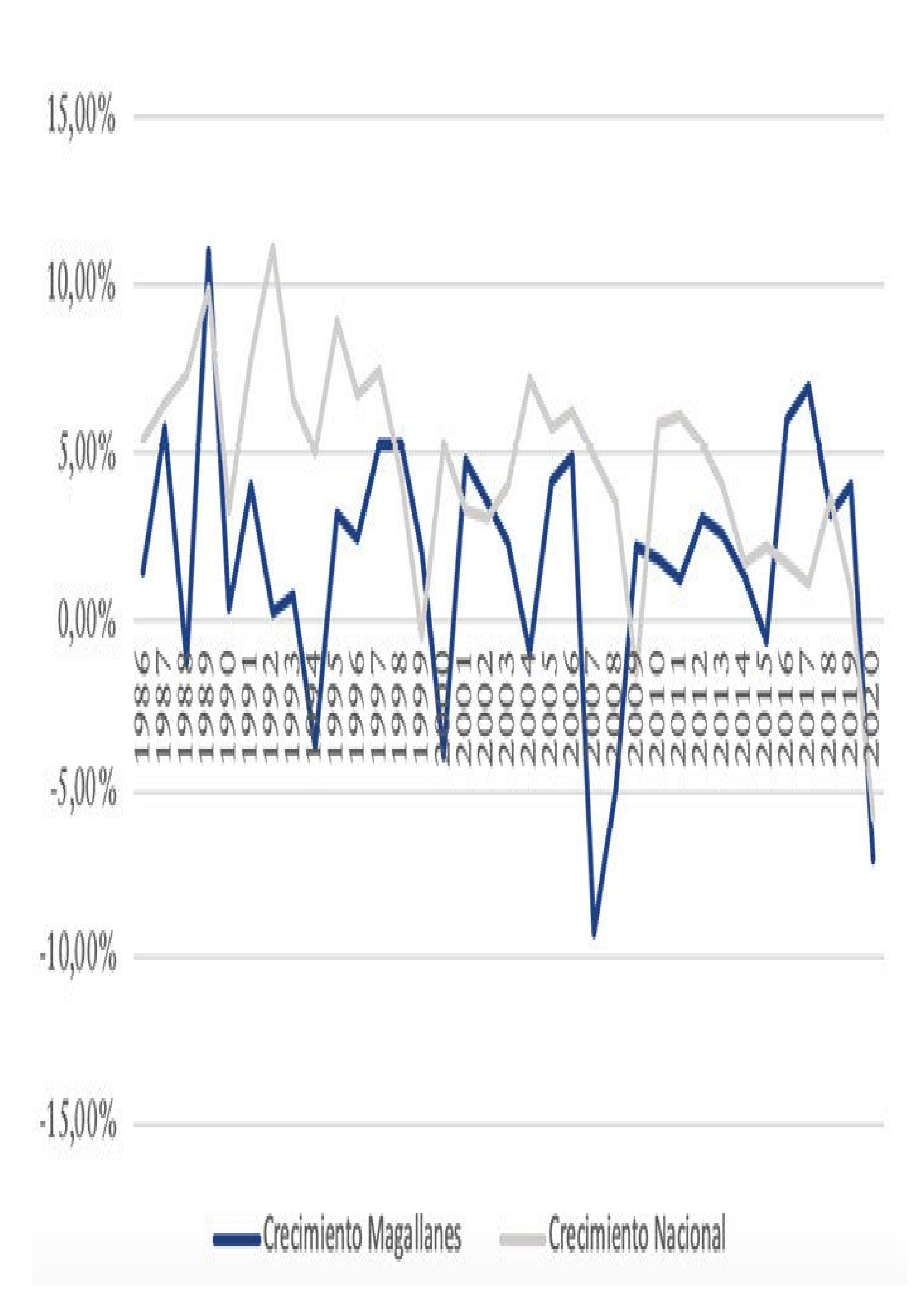
Anexo 3

Estimación de la línea base

PIB de Magallanes

La falta de conexión física de Magallanes con el resto del país, unida a una actividad económica concentrada en pocas industrias, hace que la región presente indicadores económicos que parecen independientes de la realidad general del país, como de hecho se demuestra en la ausencia de relaciones estadísticas estables entre las variables económicas regionales y las generales a nivel país. A modo de ejemplo, esta región no sufrió impacto alguno en producto y empleo durante la crisis financiera global (entre mediados de 2008 y mediados de 2009) como sí ocurrió en el resto de Chile. Magallanes tampoco vivió los efectos iniciales de la crisis social de 2019, creciendo en 2019 a una tasa de 4,1% mientras el país lo hacía al 0,9%. Como contrapartida, enfrentó su propia contracción en el año 2007 por las restricciones de GN argentino y la subsecuente caída en la producción de metanol, y en el año 2015 por la crisis que afectó al sector salmonero (ver Figura A3-1).

Figura A3-1: Crecimiento del PIB Nacional y de Magallanes, 1986-2020


15,00%
10,00%
5,00%
0,00%
-5,00%
-10,00%
-15,00%
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Crecimiento Magallanes
Crecimiento Nacional

Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Central.

Estadísticamente, la desconexión entre la actividad económica y regional se traduce en ausencia de cointegración entre ambas series. La Figura A3-2 presenta los resultados del test econométrico Dickey-Fuller Aumentado realizado sobre los residuos de la regresión lineal de largo plazo entre el PIB de Magallanes y el de Chile, ambos en logaritmos. Este test concluye que la hipótesis nula no puede ser rechazada, es decir, que no existe evidencia estadísticamente significativa que dé cuenta de cointegración.

Figura A3-2: Test de cointegración entre el PIB nacional y el PIB de Magallanes

Null Hypothesis: RES has a unit root
Exogenous: Constant
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=9)

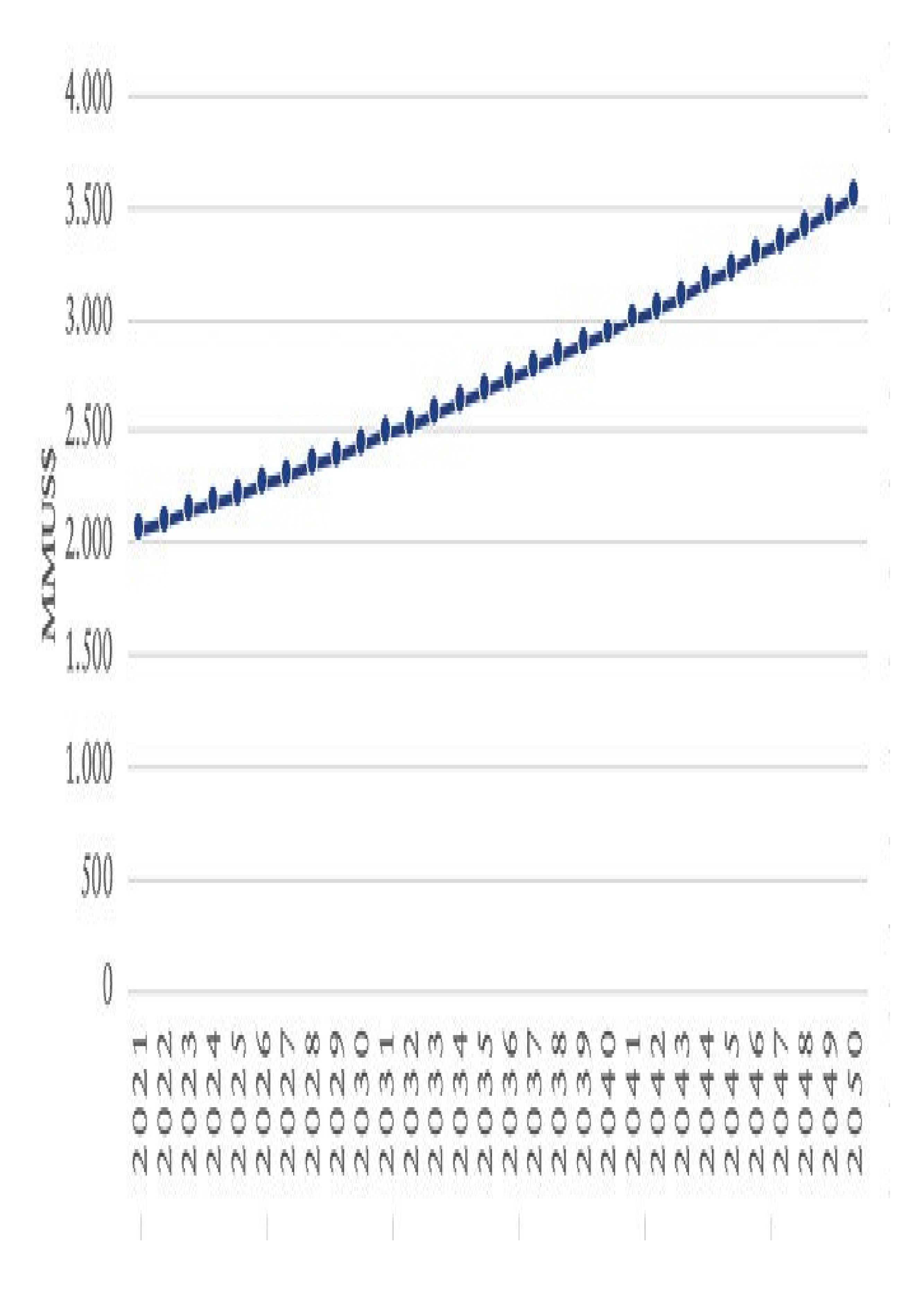
		t-Statistic
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-2.118649 0.2389	
Test critical values:	1% level	-3.632900
	5% level	-2.948404
	10% level	-2.612874

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior, se proyectó un PIB de US$2.060 millones al 2021, el que llegaría a US$2.440 millones al 2030, a US$2.945 millones al 2040 y a US$3.555 millones al 2050, con un crecimiento promedio para Magallanes de 1,9% para el periodo 2021-2050, replicando el crecimiento observado en la región entre 2002 y 2019 (ver Figura A3-3). A modo de referencia, esta tasa es similar al PIB tendencial nacional proyectado por el Banco Central en junio de 2021 para el periodo 2026-2030, el cual fue estimado en 1,7%.[79]

Figura A3-3: Proyección línea base del PIB regional de Magallanes, 2021-2050 (Cifras en millones de dólares)



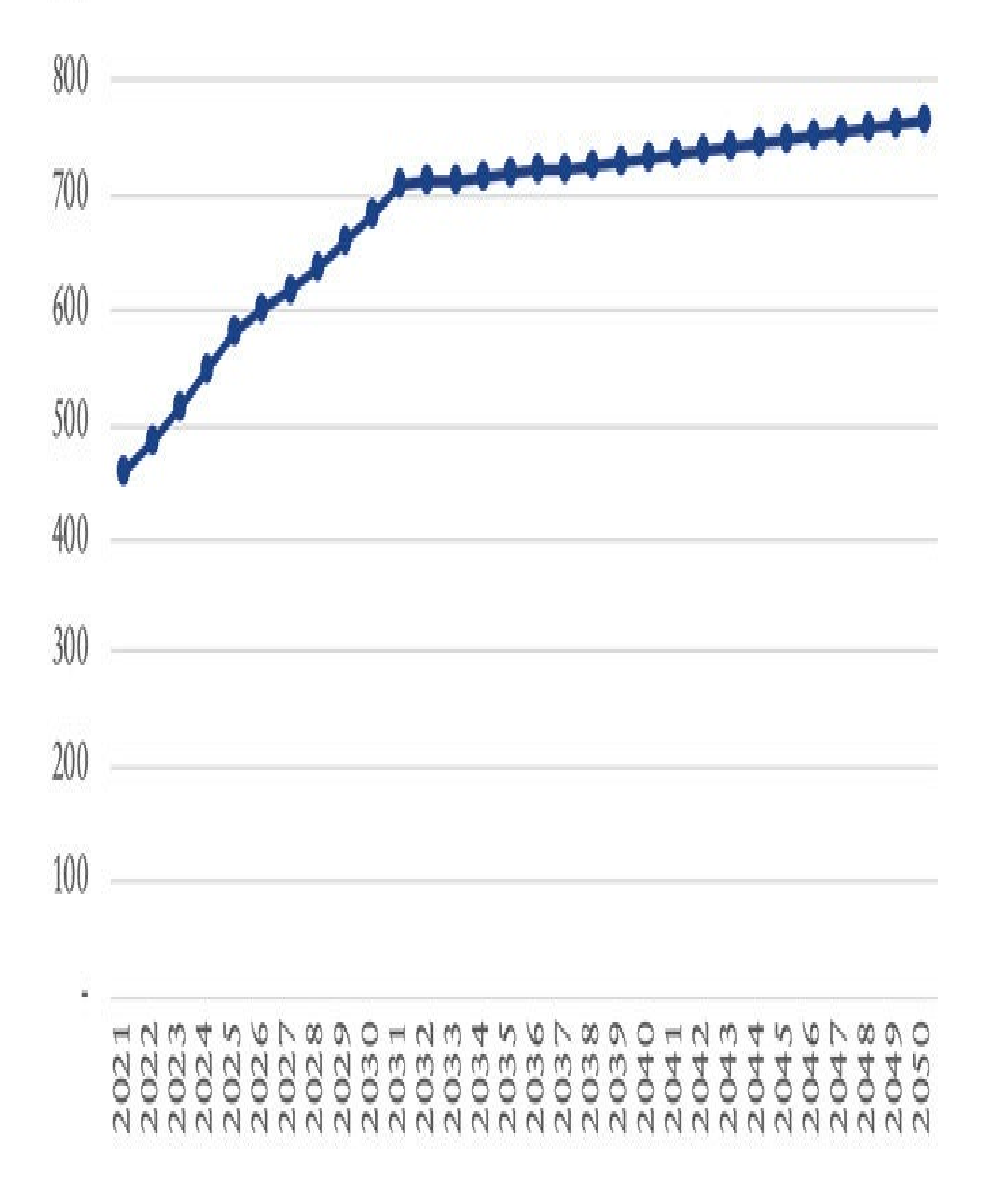
MMUSS
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050

Fuente: Elaboración propia.

Exportaciones de Magallanes

En la Tabla A3-4 se descomponen las exportaciones de Magallanes en sus principales componentes, desagregación que fue recogida para proyectar la línea base. Específicamente, se clasificaron las exportaciones en cuatro grupos: salmón, butano, metanol y otros. Para el caso del butano y del metanol, se proyectó el escenario de la línea base con exportaciones expandiéndose a tasas decrecientes, en función del agotamiento de las reservas de hidrocarburo de la región. Para las exportaciones de salmón y de las demás exportaciones se proyectó el crecimiento en función de sus tasas promedio del periodo 2004-2020. En función de lo anterior, se proyectan exportaciones de US$459 millones al 2021, las que llegarían a US$684 millones al 2030, a US$732 millones al 2040 y a US$767 millones al 2050, equivalente a un crecimiento promedio de 1,8% para Magallanes durante el periodo 2021-2050. A modo de referencia, esta tasa es inferior al crecimiento de las exportaciones nacionales proyectado por el Fondo Monetario Internacional para el periodo 2022-2026, el cual fue estimado en 3,4%.[80]

Figura A3-4: Proyección línea base de las exportaciones de Magallanes, 2021-2050 (Cifras en millones de dólares)


800
700
600
500
400
300
200
100
-
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050

Fuente: Elaboración propia.

Empleo

El empleo en Magallanes se proyectó usando un modelo SARIMAX, en donde el crecimiento del número de ocupados se modeló en base a un comportamiento autorregresivo, que depende también del crecimiento poblacional de la región. La serie mensual de ocupados se obtuvo a partir de las series trimestrales de ocupación reportadas por el INE, las cuales fueron mensualizadas, mientras que el crecimiento de la población de Magallanes se proyectó en función de la expansión proyectada por el INE. La especificación del modelo se definió en función de los correlogramas y del criterio de información de Akaike. De acuerdo a nuestras estimaciones, el empleo en Magallanes sigue un patrón no estacionario y se adapta mejor a un modelo autorregresivo de media móvil con componente estacional, cuya forma funcional se presenta en la siguiente ecuación:

SARIMAX(2,1,2) (1,1,1,12):

$$\Theta(L)^{2}\theta(L^{12})^{1}\Delta^{1}\Delta^{1}_{12}y_t = \Phi(L)^{2}\phi(L^{12})^{1}\Delta^{1}\Delta^{1}_{12}$$

Los parámetros estimados de la estimación de este modelo se presentan en la Figura A3-5.

Figura A3-5: Resultados modelo SARIMAX para estimar el empleo de Magallanes

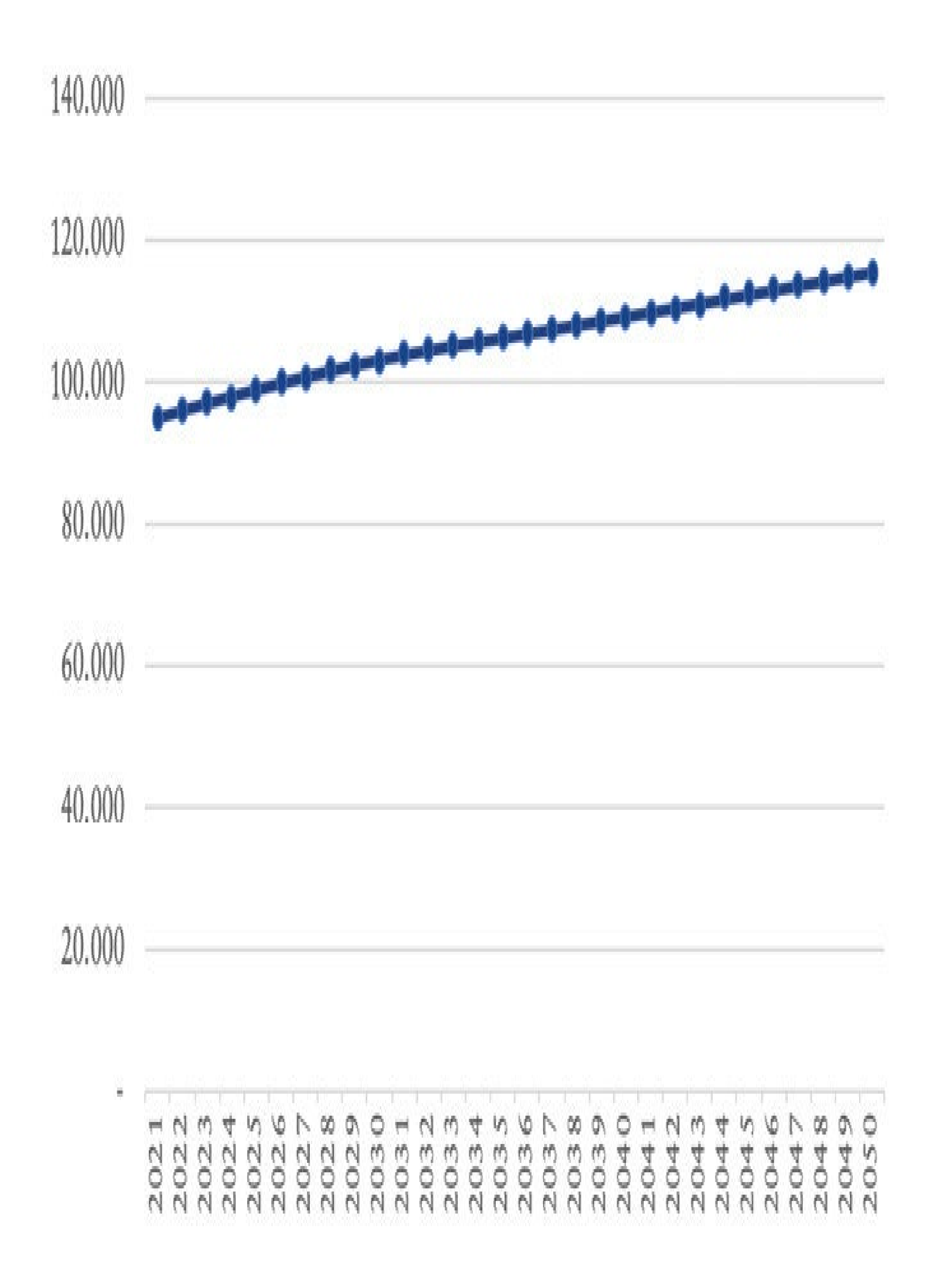
Sample: 1987m2 - 2021m6 | Number of obs = 413
Wald chi2(7) = 541.55
Log likelihood = -3453.673 | Prob > chi2 = 0.0000

DS12. ocupados	Coef.	OPG Std. Err.	z	P>|z|	[95% Conf.	Interval]
ocupados						
poblacion						
DS12.	.7468709	2.347575	0.32	0.750	-3.854292	5.348034
_cons	-.5698859	8.281791	-0.07	0.945	-16.8019	15.66213
ARMA						
ar						
L1.	-.6052767	.0800514	-7.56	0.000	-.7621745	-.4483789
L2.	-.5440556	.0665695	-8.17	0.000	-.6745294	-.4135818
ma						
L1.	.8212241	.0688716	11.92	0.000	.6862383	.95621
L2.	.8052452	.05553	14.50	0.000	.6964085	.914082
ARMA12						
ar						
L1.	-.1412308	.0760402	-1.86	0.063	-.2902668	.0078052
ma						
L1.	-1.000006	336.275	-0.00	0.998	-660.0869	658.0869
/sigma	978.2601	164483.9	0.01	0.498	0	323360.8

Fuente: Elaboración propia.

En función de los resultados obtenidos (ver Fig. A3-6) se estimó el empleo de la región para la línea base de nuestro estudio. Estimamos que a fines de 2021, el empleo en Magallanes llegaría a 95 mil ocupados, mientras que a 2030 esta cifra crecería hasta 103 mil. A 2040 en tanto, proyectamos un empleo de 109 mil puestos de trabajo, cifra que llegaría a 115 mil al 2050.

Figura A3-6: Proyección línea base del empleo de Magallanes, 2021-2050



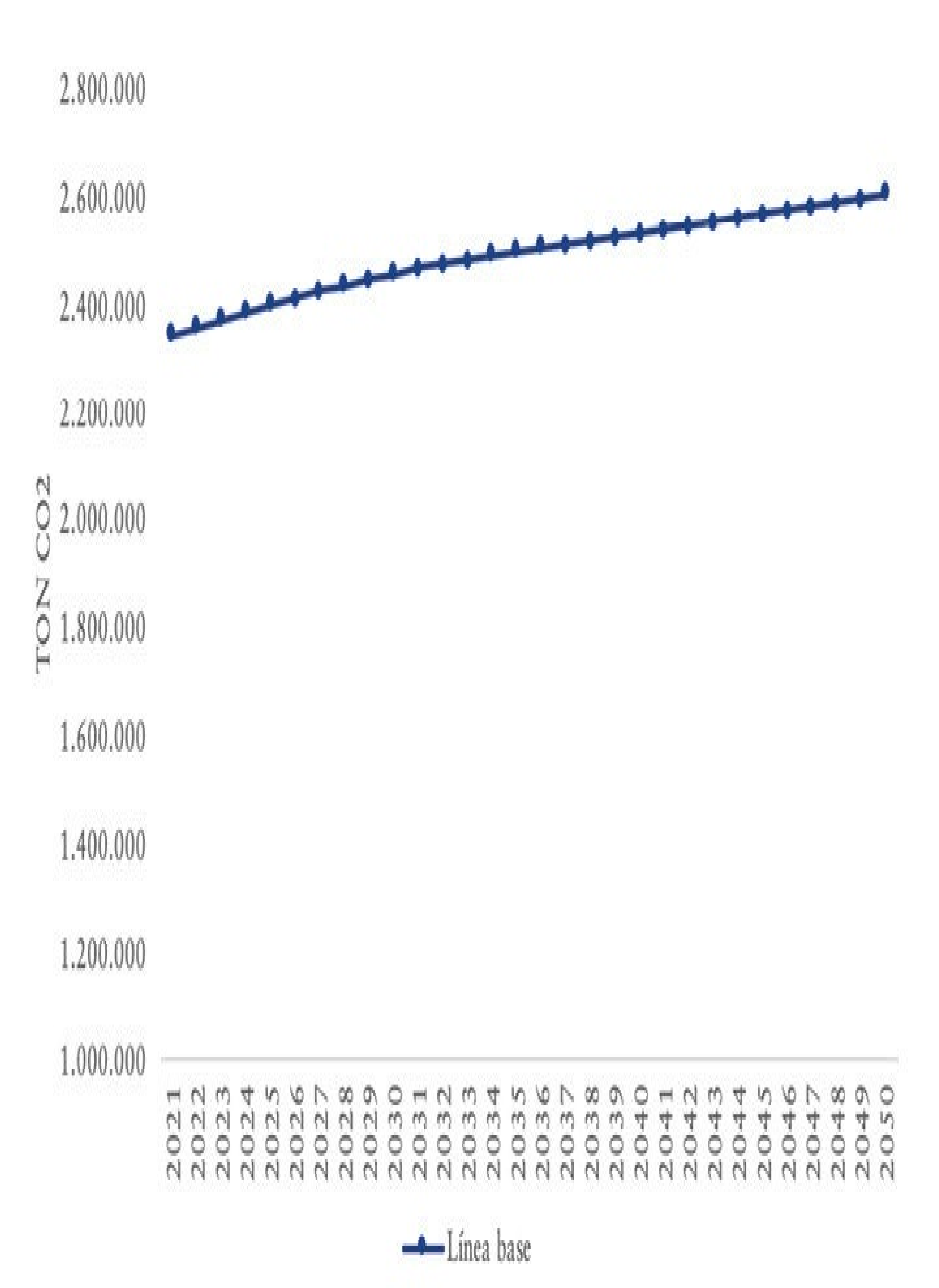
140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
-
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de CO2

Para la estimación de las emisiones brutas de CO2 en el escenario de línea base, asumimos que las emisiones per cápita de los habitantes de Magallanes, estimadas en 13 toneladas anuales entre 2013 y 2017, se mantendrían constantes hasta 2050. En consecuencia, la variación en las emisiones regionales depende del crecimiento poblacional, para el cual se usó la proyección de crecimiento demográfico del INE. Así, se estima que las emisiones regionales se incrementarían de 2,3 millones de toneladas en el año 2021, a 2,4 millones de toneladas en el 2030, aumentando posteriormente a 2,5 millones de toneladas en el 2040 y a 2,6 millones de toneladas en el 2050 (ver Figura A3-7).

Figura A3-7: Proyección línea base de las emisiones de CO_2 de Magallanes, 2021-2050 (Cifras en toneladas)



2.800.000
2.600.000
2.400.000
2.200.000
2.000.000
1.800.000
1.600.000
1.400.000
1.200.000
1.000.000
TON CO2
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
Línea base

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4

Estimación de los escenarios con industria del HV

Exportaciones

Para estimar el efecto del HV en las exportaciones de Magallanes se consideraron las producciones anuales detalladas en el capítulo sobre el impacto del proyecto de HIV en la economía regional y se asumió que la totalidad de la e-gasolina y del amoniaco verde serían destinadas al comercio internacional. En el caso del primero, se consideró un precio inicial de US$1,5/lt, en línea con el valor al que HIF espera exportar inicialmente su producción. En nuestro modelamiento asumimos que este precio converge gradualmente a US$1/lt en 2050, precio al que el e-combustible sería competitivo con la gasolina de origen convencional. En el caso del amoniaco, se consideró un precio de exportación inicial de US$400/ton, el cual converge gradualmente a US$300/ton en 2050.[81]

PIB

El PIB asociado al desarrollo de la industria del HV en Magallanes se estimó mediante el enfoque del valor agregado, esto es, se descontó de la producción a precios básicos (i.e., los ingresos asociados a las exportaciones y a las ventas en el mercado doméstico) el consumo de bienes intermedios. Para ello se recurrió a la matriz insumo-producto (MIP) elaborada por el Banco Central de Chile, actualizada a 2017, en la cual se estima el valor agregado y los consumos intermedios de 111 actividades de la economía. Como la industria del HV es de carácter incipiente, tanto a nivel local como mundial, y que -por ende- aún no forma parte de las actividades de la MIP, se debieron realizar una serie de

supuestos para estimar el valor agregado del HV a partir de esta matriz. En primer lugar, se asumió que la actividad productiva del HV podría ser aproximada mediante una combinación de las actividades “Generación de electricidad” y “Fabricación de sustancias químicas básicas”, a las que se les asignaron porcentajes del 70% y 30%, respectivamente.[82] En el caso de la “Generación de electricidad”, la MIP estima que el 51% de la producción corresponde a valor agregado, mientras que en “Fabricación de sustancias químicas básicas” el valor agregado es del 24%. Posteriormente se depuraron los consumos intermedios de ambas actividades, a fin de aproximarse de la manera más precisa al valor agregado que tendría el HV. En el caso de “Generación de electricidad”, los principales consumos intermedios son las importaciones, principalmente de combustibles fósiles que son insumidos por el sector generación, que dan cuenta del 17% del valor de la producción a precios básicos. Asumimos que en la actividad del HV se requerirían importaciones en una menor magnitud, dado que la generación ERNC no requiere ser insumida de combustibles fósiles. Asimismo, se depuraron otros conceptos que estimamos no serían consumidos por el HV, como es el caso del suministro de gas y vapor (7%), la silvicultura y extracción de maderas (1%), entre otros. Como resultado de este ejercicio, estimamos que el valor agregado de la “Generación de electricidad ajustada” sería de 82%.

Para la “Fabricación de sustancias químicas básicas” se procedió de manera análoga, depurando aquellos consumos intermedios que estimamos no serían relevantes, como la explotación de otras minas y servicios de apoyo y la minería (12%), minería del cobre (5%), suministro de gas y vapor (3%), entre otros. De esta manera, estimamos que el valor agregado ajustado de la “Fabricación de sustancias químicas básicas” para la industria del HV sería del 73%. Con la ponderación de ambas cifras, se llega a un valor agregado del 79% para la producción a precios básicos del HV.

Finalmente, el aporte al PIB consiste en multiplicar las exportaciones y las ventas en el mercado interno por el valor agregado del 79%.

Inversión

La inversión generada por la industria del HV se modeló en función de las capacidades instaladas de aerogeneración, electrolización y desalación que se incorporan en los distintos escenarios modelados en este estudio (ver Tabla A4-1). Se consideró que el CAPEX actual de la aerogeneración, estimado en US$1.349/kWh, se reduciría gradualmente a US$925/kWh en línea con las caídas en los costos observadas en la última década. Por su parte, el CAPEX de la electrolización, de US$1.050/kWel, y que corresponde al costo promedio actual de los electrolizadores PEM, convergería a US$200/kWel en línea con lo proyectado por IRENA. Finalmente, se consideró un CAPEX de US$0,925 por cada 100 m^3 de desalación diaria.

Tabla A4-1: Parámetros CAPEX HV

Item de Inversión		Unidad	Valor
Aerogenerador	Inicial	US$/kWh	1.349,0
Final 2050	US$/kWh	925,3	
Tasa	%	-3,7%	
Electrolizador	Inicial	US$/kWel	1.050
Final 2050	US$/kWel	200	
Tasa	%	-5,6%	
Desalación	Inicial	MM US$ por 100 m3/día	0,925
Final 2050	MM US$ por 100 m3/día	0,925	
Tasa	%	-	

Fuente: Elaboración propia.

Empleo

La estimación de la creación de empleo se basó en las proyecciones de capacidad instalada presentadas en este estudio y en los FTE del estudio desarrollado por la consultora Hinicio, el cual recoge experiencia tanto local como internacional. Los factores se presentan en la Tabla A4-2. De estos, los puestos de trabajo asociados a O&M corresponden a empleos permanentes, siendo los demás de carácter temporal durante el diseño, planificación y/o construcción de las plantas productoras.

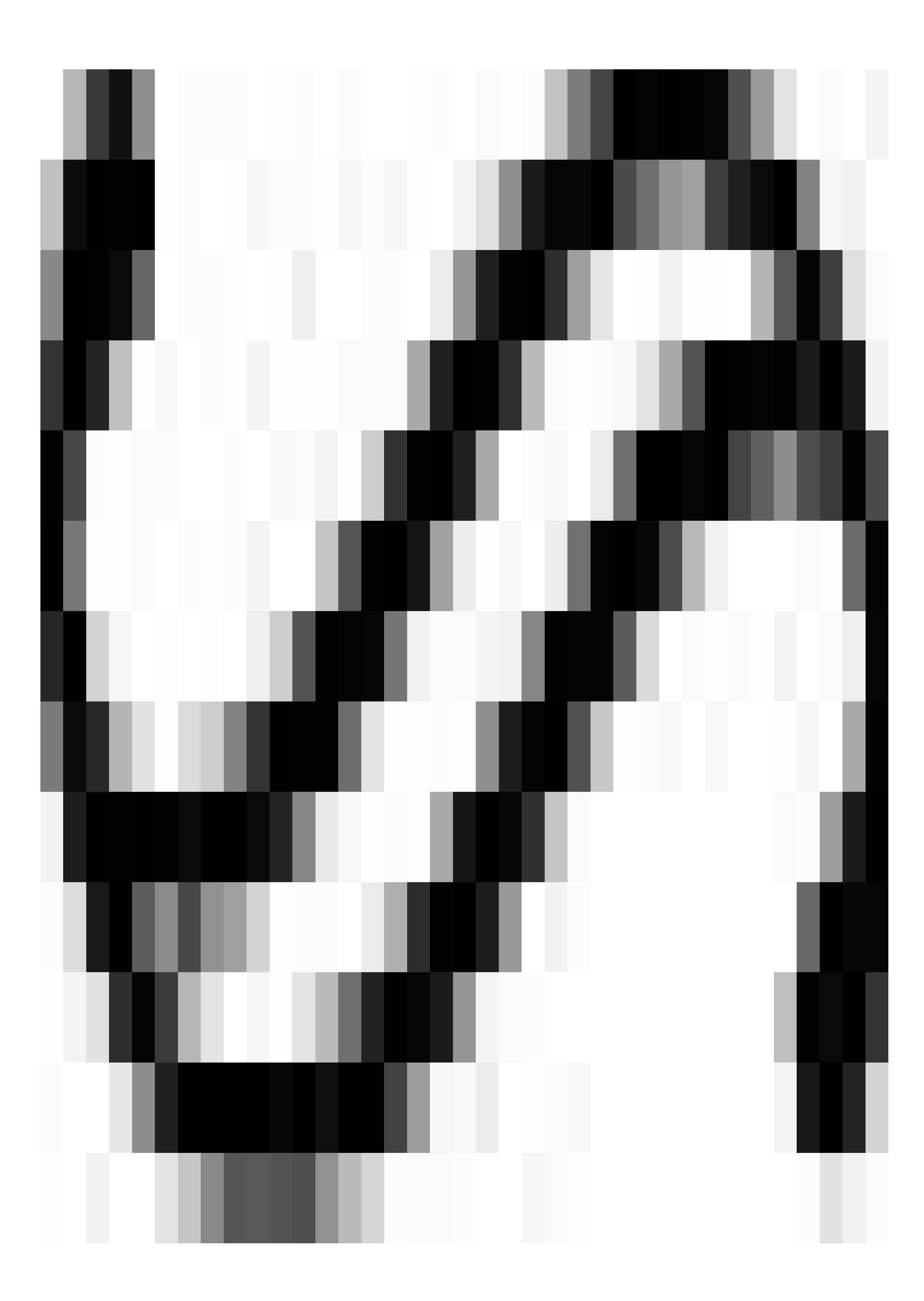
Tabla A4-2: Factores de empleo asociados a capacidad instalada

Tipo de empleo	Etapa productiva	Ratio	Valor
Empleo directo	Generación eólica (2030)	FTE/MW	6,24
Generación eólica (2040)	FTE/MW	6,15	
Generación eólica (2050)	FTE/MW	6,08	
Generación eólica O&M	FTE/MW	0,2	
Electrolisis (2030)	FTE/100MW	191,6	
Electrolisis (2040)	FTE/100MW	154,1	
Electrolisis (2050)	FTE/100MW	116,7	
Electrolisis (2030) O&M	FTE/100MW	41,7	
Electrolisis (2040) O&M	FTE/100MW	20,85	

Electrolisis (2050) O&M	FTE/100MW	20,85	
Amoniaco/Metanol (2030)	FTE/100MW	191,6	
Amoniaco/Metanol (2040)	FTE/100MW	154,1	
Amoniaco/Metanol (2040)	FTE/100MW	116,7	
Empleo indirecto	Generación eólica	FTE/FTE directo	0,4
Electrolisis	FTE/FTE directo	0,45	
Amoniaco/metanol	FTE/FTE directo	0,45	

Fuente: Elaboración propia en base a Hinicio (2020).

Referencias



•Ammonia Energy Association. “Industry report sees multi-billion ton market for green ammonia”. 2020.

•Al-Sobhi, Saad A., Ahmed AlNouss, and Mohammad Alhamad. "Techno-economic and environmental assessment of Gasoline produced from GTL and MTG processes." Computer Aided Chemical Engineering. 2021.

•Banco Mundial. “Chile: Evaluación de las Zonas Francas”. 2017.

•BBC. “Is it possible to build wildlife-friendly windfarms?” 2020.

•Columbia Center on Global Energy Policy. “Hydrogen Fact Sheet: Policy Support and Investments in Low-Carbon Hydrogen”. 2021.

•Consejo del Hidrógeno. “Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness”. 2021.

•Declaración de Impacto Ambiental. "Proyecto Piloto de Descarbonización y Producción de Combustibles Carbono Neutral". 2020.

•Encuesta CASEN. 2017.

•Encuesta CASEN en Pandemia. 2020.

•Financial Times. “Maersk takes biggest step yet to decarbonise container shipping”. 2021.

•Fondo Monetario Internacional. “World Economic Outlook, October 2021”. 2021.

•Givovich, Felipe, Quiroz, Jorge, y Schmidt-Hebbel, Klaus. “El rol del gas natural en la transición energética. Chile 2020-2050”. Ediciones El Líbero, 2021.

•Hinicio. “Cuantificación del encadenamiento industrial y laboral para el desarrollo del hidrógeno en Chile”. 2020.

•Howarth, Robert W., and Mark Z. Jacobson. “How green is blue hydrogen?” Energy Science & Engineering. 2021.

•IEA. “The Future of Hydrogen”. 2019. Disponible en https://tinyurl.com/2uavfpsw

•IEA. “Energy Technology Perspectives 2020: Special report on Carbon Capture Utilization and Storage”. 2020.

•IEA. “Global Energy Review 2021”. 2021.

•IEA (2021), Global EV Outlook 2021, IEA, París. 2021.

•IEA. “Global Energy Review 2021”. 2021.

•IPCC. “AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014”. 2014.

•IPCC. “Climate Change 2021: The Physical Science Basis”. 2021.

•IRENA. “Green Hydrogen cost 2020”. 2020.a.

•IRENA. “Renewable Power Generation Costs in 2020”. 2020.b.

•IRENA. “Renewable capacity statistics 2021”. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2021.

•IRENA and Methanol Institute. “Innovation Outlook: Renewable Methanol”. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2021.

•Jones, Ed., et al. “The state of desalination and brine production: A global outlook”. Science of the Total Environment. 2019.

•Masnadi, Mohammad S., Hassan M. El-Houjeiri, Dominik Schunack, Yunpo Li, Jacob G. Englander, Alhassan Badahdah, Jean-Christophe Monfort et al. "Global carbon intensity of crude oil production." Science 361, no. 6405. 2018.

•Martinic, Mateo (2005). “Historia del petróleo en Magallanes”. 2005.

•Ministerio de Energía. “Identificación de Potenciales Renovables: Caso Eólico”. 2021.

•Ministerio de Energía. “Política Energética Nacional”. Actualización mayo 2021. Disponible en https://tinyurl.com/2p94zv92

•Ministerio de Energía. “Chile’s Green Hydrogen Strategy and investment opportunities”. 2021.c.

•Ministerio de Energía. Explorador eólico. 2018.

•Ministerios de Energía y Minería. “Chile’s Green Hydrogen Strategy and Investment Opportunities”. Jul-2021.

•Ministerio de Hacienda. “Efectividad y aplicación práctica de los incentivos tributarios y las leyes de excepción en favor de las zonas extremas de nuestro país”. 2019.

•Ministerio del Medio Ambiente. “Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018”. 2020.

•The Royal Society. “Ammonia: zero-carbon fertilizer, fuel and energy store. Policy briefing”. 2020.

•Tremel, A. Electricity-based fuels (Vol. 941). Cham: Springer International Publishing. 2018.

•United Nations Environment Program. “Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions”. May-2021. https://bit.ly/2WZBcQ8

•U.S. Department of Energy. Hydrogen Storage Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.

•Volkswagen AG. “How electric car incentives around the world work”. 2019.

---

1 Informe IPCC -por sus siglas en inglés- de abril de 2022.

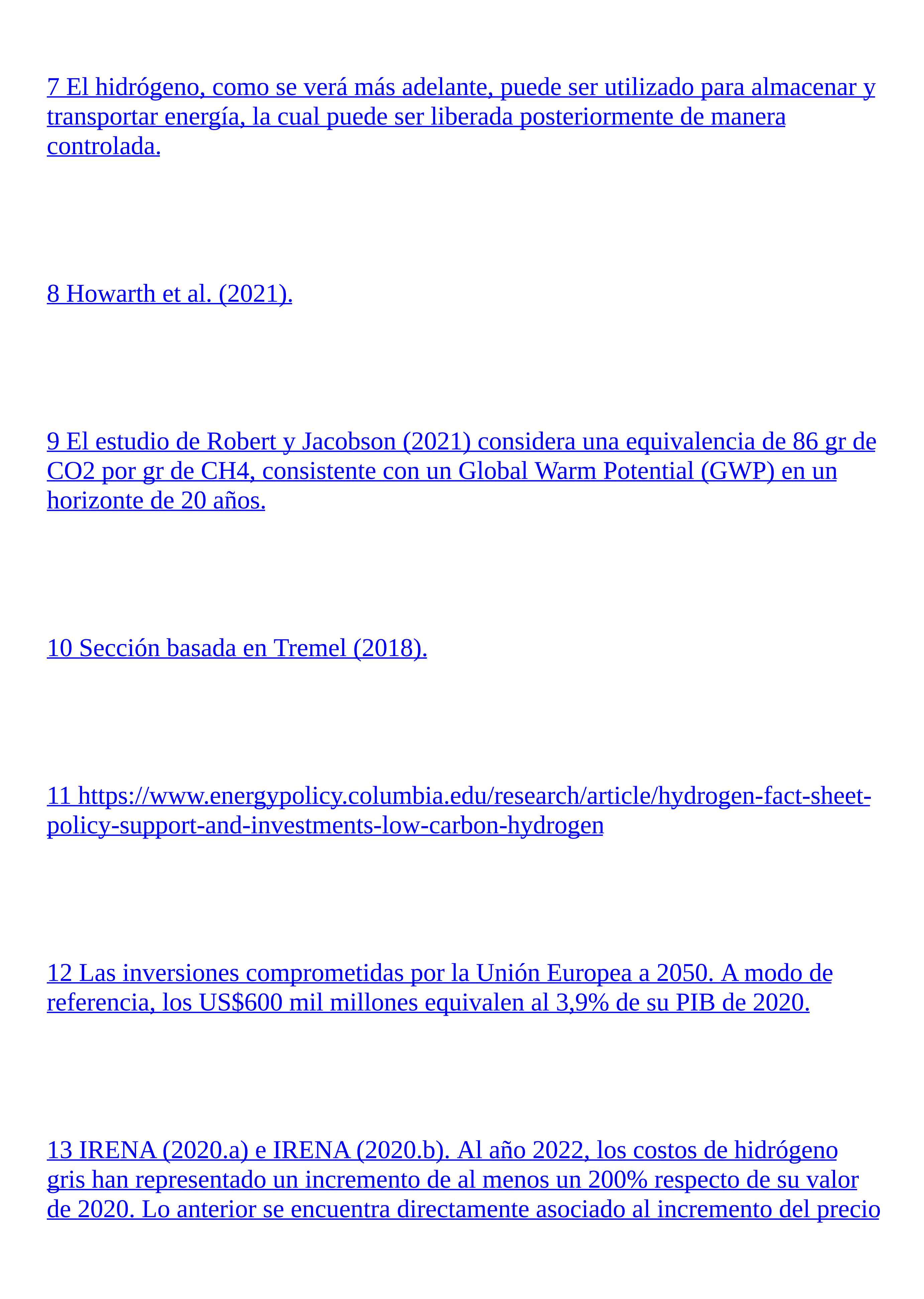
2 IEA (2021).

3 Tremel (2018).

4 La proyección corresponde al Escenario de Desarrollo Sustentable (SDS, Sustainable Development Scenario) de la IEA, recogido en el documento Global EV Outlook 2021 de la IEA.

5 IEA (2019).

6 Se estima que se emiten 10 toneladas de CO_2 por tonelada de hidrógeno producido a partir de GN y 19 toneladas de CO_2 por tonelada de hidrógeno producido a partir de carbón.



7 El hidrógeno, como se verá más adelante, puede ser utilizado para almacenar y transportar energía, la cual puede ser liberada posteriormente de manera controlada.

8 Howarth et al. (2021).

9 El estudio de Robert y Jacobson (2021) considera una equivalencia de 86 gr de CO_2 por gr de CH_4, consistente con un Global Warm Potential (GWP) en un horizonte de 20 años.

10 Sección basada en Tremel (2018).

11 https://www.energypolicy.columbia.edu/research/article/hydrogen-fact-sheet-policy-support-and-investments-low-carbon-hydrogen

12 Las inversiones comprometidas por la Unión Europea a 2050. A modo de referencia, los US$600 mil millones equivalen al 3,9% de su PIB de 2020.

13 IRENA (2020.a) e IRENA (2020.b). Al año 2022, los costos de hidrógeno gris han representado un incremento de al menos un 200% respecto de su valor de 2020. Lo anterior se encuentra directamente asociado al incremento del precio

del GN en el mercado internacional.

14 Si el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso, se debe almacenar en tanques de alta presión (entre 350 y 700 bar). Si el hidrógeno se encuentra en estado líquido, se requiere una temperatura criogénica de -252,8°C para almacenarlo y transportarlo. Ver por ejemplo https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage.

15 Costos estimados por la consultora Angus Media citados por la Ammonia Energy Association. El costo del amoniaco verde es estimado a partir de un costo de generación eléctrica de US$50/MWh.
https://www.ammoniaenergy.org/articles/industry-report-sees-multi-billion-ton-market-for-green-ammonia/

16 En lo que sigue, se utilizarán indistintamente los términos e-combustible y combustible sintético para referirse a aquellos combustibles neutros en emisiones de GEI.

17 La gasolina es una mezcla compleja de hidrocarburos con 4 -12 átomos de carbonos por molécula.

18 Fuente: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methanol-to-gasoline-process

19 Factor de eficiencia correspondiente a las actuales fases experimentales.

20 IRENA and Methanol Institute (2021).

21 IEA (2020).

22 El catastro de plantas operativas de HV proviene de la IEA. Ver IEA (2020).

23 El dato de capacidad de electrolización es una estimación de la consultora McKinsey citada en el documento preparado por los Ministerios de Energía y Minería (2021).

24 Consejo del Hidrógeno (2021).

25 IRENA (2020.a).

26 Financial Times (Agosto 2021): “Maersk takes biggest step yet to decarbonise container shipping”.

27 IRENA (2020.a) utilizando precios del GN en torno a los US$7/MMBTU. Las diferencias anteriores han tendido a reducirse producto de la escalada del precio del GN del último año que ha superado los US$30/MMBTU.

28 IRENA and Methanol Institute (2021).

29 Estos datos corresponden a promedios ponderados a nivel mundial, de acuerdo a IRENA (2020.a).

30 https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/05/how-electric-car-incentives-around-the-world-work.html

31 En el Anexo 1 se presenta el costo referencial del HV nacional.

32 https://www.corfo.cl/sites/cpp/hidrogeno-verde-chile

33 Ministerios de Energía y Minería (2021).

34 Simulaciones realizadas por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Ver: http://eolico.minenergia.cl/exploracion

35 Ministerio de Energía (2021.b).

36 https://www.revistaei.cl/2020/08/21/parque-eolico-de-enap-en-magallanes-realiza-ultimas-pruebas-para-entrar-en-operaciones/

37 Ministerios de Energía y Minería (2021).

38 Para más detalles, ver el Anexo 2.

39 Hydrogen Council (2021).

40 La inversión comprometida a la fecha se desglosa de la siguiente manera: US$51 millones corresponden al piloto de HIF “Haru Oni”, US$1.500 millones a la Fase I Cabo Negro de HIF, US$13.000 millones a la Fase II de HIF, US$3.000 millones al proyecto de HNH Energy y US$3.180 millones al proyecto de Selknam.

41 De acuerdo al Banco Central, el PIB de Magallanes en 2020 fue de US$2.466 millones, al tipo de cambio promedio de 2020 ($792/US$).

42 De acuerdo al Coordinador Eléctrico, la capacidad eólica instalada en Chile a diciembre de 2021 es de 3.729 MW.

43 Ministerio de Energía (2021.b).

44 La DIA fue aprobada en mayo de 2021.

45 El producto final producido puede ser metanol o gasolina y gas licuado, dado que para la producción de gasolina y gas licuado se utiliza como insumo el metanol producido por el reactor. Por otro lado, el oxígeno producido es un producto secundario, derivado del proceso de electrólisis.

46
https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/11/18/0e6_Cap_1_Descripcion_de_Proyecto

47 Según datos del Balance de Energía de 2019, en Chile se importan del orden de 6.554.000 m³ de petróleo diésel. La producción de HIF en su Fase II alcanzará los 2.424.0000 m³ al año, lo que equivale a una participación de 37%.

48 En el Anexo 2 se presenta una caracterización más detallada de la región de Magallanes.

49 La población corresponde a la proyección realizada por el INE a 2021, en base a información del CENSO de 2017.

50 Mateo Martinic (2005), Historia del petróleo en Magallanes.

51 Fuente: Ministerio de Energía.

52 Fuente: INE. Dato corresponde al trimestre móvil abril-junio de 2022.

53 Estimación de la SEREMI de Economía (junio 2019).

54 Cifra corresponde a la contribución del sector pesca a la actividad regional en 2019.

55 Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (2020) y proyección poblacional del INE.

56 Se entiende por cointegración de largo plazo el desplazamiento paralelo entre las variables como resultado de tendencias estocásticas comunes. En el Anexo 3 se presenta la evidencia econométrica de la inexistencia de cointegración serial entre el PIB nacional y el de Magallanes.

57 Cálculo basado en la instalación de aerogeneradores de 3,4 MW.

58 En la electrólisis se utiliza el 99,85% de la energía, mientras que el 0,15% restante se emplea en la desalación del agua.

59 El 81,5% del consumo energético corresponde a electricidad utilizada para la fabricación de HV, el 18,4% al consumo energético asociado a la captura de CO_2 y el 0,1% a la desalación.

60 En 2021, la producción mundial de amoniaco fue de 150 millones de toneladas según estadísticas reportadas por la empresa Statista.

61 Si se asume una eficiencia del 43% en el proceso de desmineralización, el consumo bruto de agua asciende a 21 litros.

62 Los detalles del cálculo realizado se presentan en el Anexo 4.

63 TEU corresponde a la capacidad de carga que tiene un contenedor estándar de 20 pies de largo.

64 Esta estimación se basa en la inversión anunciada para el Puerto de Gran Escala de San Antonio, el que tendrá una capacidad de 6 millones de TEU/año y supondrá una inversión de US$2.400 millones.

65 Esta estimación se basa en la inversión realizada por Vestas en Colorado el

año 2008, en la que se invirtieron US$100 millones en una fábrica con capacidad productiva de 1.200 aspas al año y US$240 millones en una fábrica con capacidad productiva de 900 torres al año.

66 Los FTE provienen del informe Hinicio (2020).

67 Los temporales se estimaron en función de la capacidad marginal modelada, tanto de generación eólica como de electrólisis. Los empleos temporales de construcción asumen un FTE de 3,41 por MW adicional instalado de capacidad eólica y un FTE de 1,13 por MW de electrólisis adicional. Los otros empleos temporales consideran un FTE de 2,83 por MW de capacidad eólica marginal y de 0,79 por MW de electrólisis.

68 Cabe señalar que la producción de e-combustibles podría reducir también la emisión de gases de efecto local. Sin embargo, dado el carácter experimental de este combustible, no fue posible encontrar fuentes oficiales que respaldaran estas reducciones, razón por la cual no fueron estimadas en este informe.

69 Se estima que las emisiones aguas arriba en la producción de combustibles fósiles atribuibles a cada unidad energética representan del orden de 16% de las emisiones liberadas durante el proceso de combustión. Ver Masnadi, Mohammad S., et al. “Global carbon intensity of crude oil production.” Science 361.6405 (2018): 851-853.i disponible en https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar6859

70 La producción de amoniaco gris requiere de 8 MWh por tonelada de amoniaco producido. Si se asumen emisiones de 0,4 toneladas de CO_2 por MWh generado por gas natural, se llega a un ahorro de 3,2 toneladas de CO_2 por tonelada de amoniaco verde producido. Este cálculo supone que se desplaza el amoniaco gris y no otro combustible. Ver The Royal Society (2020).

71 Cálculo realizado sobre las emisiones brutas totales liberadas por Chile en el año 2018, las que alcanzaron 112,3 millones de toneladas. Ver Ministerio de Medio Ambiente (2020).

72 Ver Jones, Ed., et al. (2019).

73 Documento disponible en https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia_eolica.pdf

74 Ver, por ejemplo, los lineamientos definidos por la U.S Fish and Wildlife Service: https://www.fws.gov/ecological-services/es-library/pdfs/WEG_final.pdf

75 https://www.bbc.com/future/article/20200302-how-do-wind-farms-affect-bats-birds-and-other-wildlife.

76 En la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) presentada por HIF para su proyecto piloto el 9 de febrero de 2021, aprobada el 14 de mayo de 2021, se presentaron antecedentes que acreditan que la posibilidad de colisión de aves es remota. Lo anterior fue sustentado en un estudio de tránsito aéreo acompañado por la empresa. Además, se citó literatura internacional en la que se señala que las colisiones esperadas para aerogeneradores modernos son de 1-2 colusiones/turbina/año. En la DIA la empresa también afirmó que el proyecto no se encuentra emplazado en un corredor biológico de especie alguna, y que se utilizarán luces menos atractivas y por consiguiente, menos peligrosos para las aves en línea con las disposiciones de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y las sugerencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

77 Esta pregunta no se realizó en la CASEN de 2020, por eso se opta por mantener el valor de la CASEN 2017.

78 Dado que la encuesta CASEN 2020 fue realizada por teléfono, se le dio prioridad a la medición de pobreza por ingresos, dejando fuera preguntas que se utilizan en la estimación de pobreza multidimensional. Así, para la CASEN 2020 no hay una cifra oficial de pobreza multidimensional.

79 Proyección del PIB tendencial publicada en el IPoM de junio de 2021 por el Banco Central.

80 Proyección publicada en el World Economic Outlook de octubre de 2021 por el Fondo Monetario Internacional.

81 Precios del HV e hidrógeno gris provienen de The Royal Society (2020).

82 Porcentajes definidos en base al criterio de los consultores.